



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica

Ano 2013

Elena Casian

**Recuperação de energia em processos de
incineração de resíduos**



Elena Casian

**Recuperação de energia em processos de
incineração de resíduos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Manuel Arlindo Amador de Matos, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, e coorientação do Professor Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

“Tudo que faço ou medito

fica sempre na metade.

Querendo, quero o infinito.”

Fernando Pessoa

o júri

Presidente

Professor Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Manuel Arlindo Amador de Matos

Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

(Orientador)

Professor Doutor Mário Manuel Gonçalves da Costa

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico de Lisboa

(Arguente)

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador Professor Arlindo Matos pela oportunidade de realização deste trabalho pelo todo o apoio prestado, paciência e qualidade na orientação em termos do rigor e capacidade científica.

Também agradeço ao professor Fernando Neto pela orientação e apoio.

Agradeço aos Engenheiros Abílio Almeida do Sistema Intermunicipal da Lipor, e José Paulo da Silva, diretor da Port'Ambiente pelas informações amavelmente cedidas.

Agradeço ao meu marido Gheorghii e a minha filha Sandra pela paciência e compreensão, por me terem ajudado a seguir em frente.

Pessoalmente, agradeço aos meus amigos Mário Herédia, Hélder Nunes, Gloria Santos, Catarina Ferreira como também a todos os outros colegas do curso pela força e apoio sempre manifestado.

Agradeço ainda ao meu amigo e antigo colega Ilie Sandu pela amizade e apoio que me deu nesta etapa da minha vida.

palavras-chave

Gestão de resíduos, incineração dos resíduos, balanço mássico, balanço energético, valorização, recuperação de energia, fórmula R1.

Resumo

O presente trabalho analisa a recuperação de energia a partir da incineração de resíduos urbanos (RU) sob as formas de calor e trabalho mecânico, pretendendo ser uma contribuição para a avaliação de desempenho energético de uma instalação de incineração de resíduos urbanos.

Para o efeito, foi efetuado o balanço mássico e energético em condições nominais de funcionamento, tendo sido calculados os caudais mássicos de combustível auxiliar, de ar e de produtos de combustão e ainda a potência térmica disponível.

Por outro lado estabeleceu-se um modelo termodinâmico do ciclo Rankine em funcionamento numa instalação, com base no aplicativo Cyclepad.

A informação de base para a modelização foi obtida por inquérito junto de um operador de incineração de resíduos urbanos e por pesquisa de informação disponível na Web.

Os resultados obtidos para o caso de estudo mostram que o balanço mássico e energético pode complementar a análise termodinâmica do ciclo de Rankine, permitindo ambas representar o essencial do processo de incineração de resíduos urbanos sob os pontos de vista técnico e ambiental.

A aplicação dos referidos modelos ao caso de estudo, permitiu concluir que a manutenção da incineração de 1100 ton/dia de resíduos urbanos em condições apropriadas ao longo do ano, exige a utilização permanente de combustível auxiliar, em particular quando o teor de humidade dos resíduos é superior a cerca de 30%, para que seja possível assegurar a produção de trabalho mecânico útil (energia elétrica vendida à rede) de cerca de 22 MWe. Contudo a melhoria do poder calorífico do resíduo poderia contribuir para reduzir a referida necessidade de combustível auxiliar.

Tendo em conta as atuais circunstâncias do caso de estudo, conclui-se que nas condições operatórias indicadas e em particular tendo em conta o PCI e o teor de humidade dos resíduos, a tecnologia corrente de incineração não deverá permitir atingir os níveis de eficiência que suportem o estatuto de valorização de resíduos R1, acordo com a eficiência de recuperação de energia dada pela fórmula R1.

A melhoria da eficiência do processo exige ou uma aplicação útil para o calor residual (aquecimento, secagem, *etc.*), ou a melhoria do poder calorífico (redução do teor de humidade, através de uso de CDR, *etc.*) ou a melhoria da tecnologia de recuperação de energia (extração e reaquecimento do vapor durante a expansão, aumento da pressão de operação da caldeira, *etc.*

keywords

waste management, waste incineration, mass balance, energy balance, recovery operations, energy recovery, energy efficiency formula R1.

abstract

In this dissertation it is analyzed the energy recovery from a municipal waste incineration plant as of heat and mechanical work in order to contribute to the evaluation of the energy performance of a waste incineration plant.

For this purpose it was made the mass and energy balances at the nominal operating condition and it was calculated mass flow rates of air and combustion products and also the thermal power.

Moreover it was established a Rankine cycle thermodynamic model of the system based on the simulation Cyclepad application. The basic information for modeling was got from a query to the staff of waste incineration plant.

From the case study, it can be concluded that the incineration of 1100ton/day of municipal waste, under appropriate conditions, needs permanent use of auxiliary fuel, especially when the waste moisture content exceeds 30%, in order to assure useful electric power of 22 MWe. However the increase of the waste heating value could reduce the needs of auxiliary fuel.

Taking into account the present conditions of case study, it can be concluded that it is not possible to the incineration plant achieve the recovery efficiency level that supports incineration status as a recovery operation R1.

In order to improve the energy efficiency R1 of the municipal waste incineration process, it is mandatory the use of the residual heat for any useful propose (heating, drying, *etc.*) or the improvement of the heating value (moisture reduction content, RDF, *etc.*) or improvement of the technology (steam extraction and reheating, increase of the boiler pressure, *etc.*),

Índice

Índice	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vii
Lista de abreviaturas	ix
Nomenclatura	xi
1.1 Introdução	2
1.2 Caracterização de resíduos urbanos	4
1.3 A incineração de resíduos urbanos	6
1.3.1 Características do processo	7
1.3.2 Condições legais	8
1.3.2.1 Operação	9
1.3.2.2 Monitorização	10
1.3.3 Melhores tecnologias disponíveis	10
1.4 A incineração como operação de gestão de resíduos	13
1.5 Valorização vs eliminação de resíduos	14
1.5.1 A recuperação material em processos de incineração	15
1.5.2 Recuperação de energia	15
1.6 Eficiência da recuperação de energia - Fórmula R1	16
1.7 Objetivos da tese	23
2.1 Balanço mássico	24
2.1.1 Reagentes	25
2.1.1.1 Resíduos a incinerar	25
2.1.1.2 Ar de combustão	27
2.1.2 Necessidades de ar de combustão	28
2.1.3 Produtos de combustão	29
2.1.3.1 Resíduos sólidos de incineração	29
2.1.3.2 Gases de combustão	30
2.2 Balanço energético	31
2.2.1 Energia dos reagentes	33
2.2.2 Energia dos produtos	34
2.3 Condições de operação	35
2.4 Tecnologias de incineração	36
2.4.1 Incineradores de grelhas móveis;	36
2.4.2 Forno rotativo	38
2.4.3 Incinerador de leito fluidizado;	39
2.5 Emissões	41
2.6 Recuperação de energia a partir de resíduos	43

3.1	Recuperação de energia mecânica e de calor	45
3.2	Ciclo de Rankine	46
3.3	Tecnologias associadas ao uso do ciclo de Rankine	49
3.3.1	Componentes do Ciclo de Rankine	50
3.3.1.1	Caldeira	50
3.3.1.2	Bombas	50
3.3.1.3	Condensador.....	51
3.3.1.4	Modelo de turbina a vapor com extração.....	51
3.4	Avaliação de desempenho energético	52
3.4.1	Aplicação de balanço mássico e energético	53
3.4.2	Aplicação Cyclepad	53
4.1	Caracterização da LIPOR	55
4.1.1	Produção de resíduos.....	56
4.1.2	Infra-estruras de gestão de resíduos.....	56
4.1.3	Composição dos resíduos da LIPOR	58
4.1.4	A recuperação de energia na LIPOR	59
4.2	Unidade de incineração da LIPOR	60
4.2.1	Receção de resíduos	60
4.2.2	Sistema de alimentação	60
4.2.3	Grelha - processo de combustão.....	61
4.2.4	Recuperação de energia	62
4.2.5	Tratamento de efluentes gasosos	63
5.1	Recolha de informação	66
5.2	Balanço mássico	67
5.2.1	Composição dos resíduos a incinerar	67
5.2.2	Composição dos produtos de incineração	68
5.2.3	Caudais mássicos.....	70
5.3	Balanço energético	70
5.3.1	Energia e potência térmicas disponíveis	70
5.3.2	Temperatura máxima de combustão	71
5.4	Análise do sistema de recuperação de energia.....	73
5.4.1	Ciclo Rankine.....	73
5.4.2	Pressupostos	74
5.4.3	Variáveis principais do processo	76
5.4.4	Resultados	78
5.4.4.1	Turbinas	78
5.4.4.2	Bombas	79
5.4.4.3	Caldeira	81
5.4.4.4	Permutadores de calor.....	82

5.4.5	Rendimento de conversão de energia.....	83
5.5	Análise da aplicação da fórmula R1	84
5.5.1	Eficiência R1	85
5.5.2	Processos de melhoria da eficiência de acordo com a fórmula R1	85
6.1	Conclusões	88
6.2	Limitações do trabalho	89
6.3	Sugestão para trabalho futuro	90
	Referências bibliográficas	91
	Anexo A – Inquérito ao processo de incineração de resíduos da LIPOR.....	94
	Anexo B – Sinóptico da incineração de resíduos da LIPOR.....	97
	Anexo C – Quadro de simulação da eficiencia R1 da unidade de incineração	98

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Evolução da produção e da capitação dos resíduos urbanos em Portugal Continental	3
Figura 1.2 - Gestão de RSU para o ano 2011 -2012.	3
Figura 1.3 - Caracterização física média dos RU produzidos Portugal Continental em 2011.....	4
Figura 1.4 - Resíduos encaminhados para valorização energética (RU) e distribuição dos diferentes tipos de resíduos por material (ton).....	5
Figura 1.5 - Fronteira do sistema de eficiência energética	18
Figura 1.6 - Eficiência energética na combustão de diferentes combustíveis.....	20
Figura 1.7 - Eficiência R1 calculada para diferentes unidades de incineração de resíduos	21
Figura 1.8 - Comparação da eficiência R1 de unidades de incineração em função do tipo de recuperação de energia para os períodos de 2004-2007 e 2007-2010.	22
Figura 2.1 - Componentes entálpicos da combustão de um resíduo	32
Figura 2.2 - Balanço energético geral ao incinerador	33
Figura 2.3 - Estrutura de um sistema de grelhas (grelha recíproca para a queima de RSU).	37
Figura 2.4 - Esquema de um sistema de combustão em forno rotativo.	38
Figura 2.5 – Incineração em leito fluidizado.....	40
Figura 3.1 - Ciclo simples de Rankine e respetivo diagrama T-s	47
Figura 3.2 - Esquema de uma central térmica de ciclo de Rankine.	49
Figura 4.1 - Posicionamento geográfico da LIPOR.....	55
Figura 4.2 - Resíduos recebidos de Janeiro a Outubro de 2013 (ton) pela LIPOR.....	56
Figura 4.3 - Encaminhamento dos resíduos urbanos indiferenciados na LIPOR.	58
Figura 4.4 - Composição física média dos RSU. Dados da campanha de caraterização 2009.	59
Figura 4.5 - Esquema da instalação de incineração de resíduos LIPOR	61
Figura 4.6 - a) Esquema de funcionamento reator e b) Reator da Central Lipor II	65
Figura 5.1 - Temperatura máxima de combustão em função da humidade do resíduo	72
Figura 5.2 - Necessidade de gás natural em função do teor de humidade e do poder calorífico do resíduo.....	73
Figura 5.3 - Esquema do modelo ciclo de Rankine realizado com a aplicação Cyclepad.	74
Figura 5.4 – Condições de funcionamento dos diferentes componentes do ciclo.....	75
Figura 5.5 – Condições conhecidas e assumidas das principais variáveis do fluido operante (água/vapor)	76
Figura 5.6 - Condições conhecidas e assumidas para o fluido operante Ar (Aquecimento do ar primário).	77
Figura 5.7 - Parâmetros de funcionamento das turbinas.....	78
Figura 5.8 - Condições de operação das bombas	81
Figura 5.9 - Parâmetros de operação da caldeira.....	82
Figura 5.10 - Condições de operação impostas aos permutadores de calor	83

Figura 5.11 - Eficiência R1 em função do teor de humidade dos resíduos.	85
--	----

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Tipos de resíduos.....	6
Tabela 1.2 - Vantagens e desvantagens da incineração em massa	11
Tabela 1.3 - Teor de materiais encontrados nas cinzas dos resíduos incinerados.....	15
Tabela 1.4 - Eficiência de recuperação de energia calculada através da fórmula R1.....	19
Tabela 2.1 - Composição dos resíduos orgânicos.....	25
Tabela 2.2 - Composição dos resíduos inorgânicos.....	25
Tabela 2.3 - Poder calorífico dos constituintes do resíduo	26
Tabela 2.4 - Valores - limite de emissão para as médias diárias de partículas totais, HCl, COT, HF, SO ₂ , NO _x , CO e NH ₃	42
Tabela 2.5 - Eficiência para diferentes tipos de recuperação de energia.....	44
Tabela 3.1 - Propriedades da água.....	46
Tabela 4.1 - Encaminhamento de resíduos para destino final (ton).	57
Tabela 4.2 - Consumos internos de energia importada.....	60
Tabela 4.3 - Condições de operação da incineração LIPOR.....	62
Tabela 4.4 - Valores de emissão de poluentes monitorizados na LIPOR	64
Tabela 5.1 - Composição próxima e elementar da mistura de resíduos R (base seca).....	68
Tabela 5.2 - Composição próxima e elementar da mistura de gás natural (base seca).	68
Tabela 5.3 - Composição dos gases de combustão na instalação (inquérito).	69
Tabela 5.4 - Composição calculada dos gases de combustão.....	69
Tabela 5.5 - Potência das bombas.....	80
Tabela 5.6 - Resumo do funcionamento do ciclo Rankine	84

Lista de abreviaturas

APA	- Agência Portuguesa do Ambiente
ANR	- Autoridade Nacional de Resíduos
BAT	- Best Available Technology
BREF	- Reference Document on the Best Available Techniques
CE	- Comissão Europeia
CDR	- Combustível Derivado do Resíduo
CLF	- Combustão em leito fluidizado
COT	- Carbono Orgânico Total
CVEL	- Central de Valorização Energética Lipor
DL	- Decreto-Lei
ETAR	- Estação de Tratamento de Águas Residuais
FWD	- Frame Work Directive
IPCC	- Intergovernmental Pannel on Climate Change
PAH	- Polycyclic Aromatic Hidrocarbons
PCDD	- Polychlorinated dibenzodioxins (Dioxinas)
PCDF	- Polychlorinated dibenzofurans (Furanos)
RU	- Resíduos urbanos
RSU	- Resíduos Sólidos Urbanos
REEE	- Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos
RUB	- Resíduos Urbanos Biodegradáveis
UE	- União Europeia
VLE	- Valor Limite de Emissão
WtE	- Waste to Energy

Nomenclatura

cp_v	- Calor específico a pressão constante do vapor de água	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
cp_w	- Calor específico a pressão constante da água líquida	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
$\overline{cp_i}$	- Calor específico médio a pressão constante do gás i referido a T^0	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
cp_z	- Capacidade calorífica das cinzas	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
cp_R	- Capacidade calorífica media do resíduo a incinerar em base seca	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
h_{wv,T^0}	- Calor latente de vaporização da água à temperatura T^0	$[J.kg^{-1}]$
h	- Entalpia específica da água ou vapor	$[J.kg^{-1}]$
$h_{fg,T}$	- Calor latente de vaporização da água	$[J.kg^{-1}]$
ΔH_{sR}	- Calor sensível dos reagentes	$[J.kg^{-1} R bs]$
ΔH_{LR}	- Calor latente dos reagentes	$[J.kg^{-1} R bs]$
ΔH_{rR}	- Calor de reação química dos reagentes	$[J.kg^{-1} R bs]$
ΔH_{sP}	- Calor sensível dos produtos	$[J.kg^{-1} R bs]$
\dot{m}	- Caudal mássico	$[kg.s^{-1}]$
M_i	- Massa molar do componente i gasoso	$[kg i/kmol i]$
PCI_i	- Poder calorífico inferior do componente i em base seca	$[J.kg^{-1} i bs]$
PCI_R	- Poder calorífico inferior de uma mistura R em base seca	$[J.kg^{-1} R bs]$
PSC_R	- Poder calorífico superior de uma mistura R em base seca	$[J.kg^{-1} R bs]$
Q_{sai}	- Potência térmica rejeitada no condensador	$[MW]$
\dot{Q}_{sai}	- Potência térmica rejeitada no condensador	$[MW]$
Q_{adm}	- Energia térmica útil fornecida ao vapor na caldeira	$[J]$
\dot{Q}_{adm}	- Potência térmica útil fornecida ao vapor na caldeira	$[MW]$
S	- Entropia	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
T	- Temperatura	$[^{\circ}C]$
T_0	- Temperatura de referência ($25^{\circ}C$)	$[^{\circ}C]$
T_R	- Temperatura do resíduo a incinerar	$[^{\circ}C]$
T_{max}	- Temperatura máxima de combustão	$[^{\circ}C]$
$T_{adiabática}$	- Temperatura adiabática da chama	$[^{\circ}C]$
T_A	- Temperatura do ar de combustão	$[^{\circ}C]$
T_2	- Temperatura dos produtos de combustão	$[^{\circ}C]$
T_E	- Temperatura das escórias	$[^{\circ}C]$
W_B	- Trabalho mecânico consumido pela bomba	$[J]$
\dot{W}_B	- Potência mecânica consumida pela bomba	$[kW]$
W_T	- Trabalho mecânico produzido pela turbina	$[J]$
\dot{W}_T	- Potência mecânica produzida pela turbina	$[MW]$
w_{CR}	- Fração mássica de carbono no resíduo em base seca	$[kg carbono.kg^{-1} R]$

w_{HR}	- Fração mássica de hidrogénio no resíduo em base seca R]	[kg hidrogénio.kg ⁻¹ R]
w_{OR}	- Fração mássica de oxigénio no resíduo em base seca	[kg oxigénio.kg ⁻¹ R]
w_{NR}	- Fração mássica de azoto no resíduo em base seca	[kg azoto.kg ⁻¹ R]
w_{SR}	- Fração mássica de enxofre no resíduo em base seca	[kg enxofre.kg ⁻¹ R]
w_{ZR}	- Fração mássica de cinza no resíduo em base seca	[kg cinza.kg ⁻¹ R]
W_{WR}	- Razão mássica de humidade do resíduo em base seca	[kg água.kg ⁻¹ R]
w_{WR}	- Fração mássica de humidade da mistura H em base tal e qual	[kg água.kg ⁻¹ H]
w_{iH}	- Fração mássica do componente i numa mistura H em base tal e qual	[kg i btq.kg ⁻¹ H btq]
w_{iR}	- Fração mássica do componente i bs numa mistura R em base seca	[kg i bs.kg ⁻¹ R bs]
w_{Wi}	- Fração mássica da humidade no componente i em base tal e qual	[kg H ₂ O.kg ⁻¹ i btq]
w_{ji}	- Fração mássica do elemento químico j no componente i em base seca	[kg j.kg ⁻¹ i bs]
w_{jR}	- Fração mássica do elemento químico j numa mistura em base seca	[kg j.kg ⁻¹ R bs]
W_{Wi}	- Razão mássica da humidade no componente i em base seca	[kg H ₂ O.kg ⁻¹ i bs]
w_{WH}	- Fração mássica da humidade numa mistura em base tal e qual	[kg H ₂ O.kg ⁻¹ H btq]
W_{WR}	- Razão mássica da humidade numa mistura em base seca	[kg H ₂ O.kg ⁻¹ R bs]
W_{VA}	- Razão mássica da humidade no ar de combustão	[kg H ₂ O.kg ⁻¹ A bs]
W_a	- Razão mássica atual de oxigénio de combustão	[kg O _{2,a} .kg ⁻¹ R bs]
W_s	- Razão mássica estequiométrica de oxigénio de combustão	[kg O _{2,st} .kg ⁻¹ R bs]
W_{AR}	- Razão mássica atual de ar de combustão	[kg A bs.kg ⁻¹ R bs]
w_{CE}	- Fração mássica do carbono na escória em base seca	[kg C.kg ⁻¹ E bs]
w_{ZR}	- Fração mássica das cinzas numa mistura em base seca	[kg Z.kg ⁻¹ R bs]
w_{Zi}	- Fração mássica das cinzas no componente i em base seca	[kg Z.kg ⁻¹ i bs]
y_{iA}	- Fração molar do componente i do ar de incineração seco A]	[kmol i /kmol ar]
W_{VA}	Razão mássica de vapor no ar de incineração ar seco A]	[kg de H ₂ O.kg ⁻¹ de
z	- Excesso de ar de combustão	[%]
λ	- Razão de equivalência (lambda) de uma mistura combustível	[-]

Subscritos

H	- mistura de resíduos em base tal e qual (btq)
F	- mistura de combustível (gás natural) em base seca (bs)
R	- mistura de resíduos em base seca (bs)
V	- produtos incinerados volantes secos
E	- produtos incinerados escória secos
A	- Ar atmosférico
W	- Água líquida

V - Vapor de água

btq = base tal e qual; bs = base seca;

j - Índice de elemento químico ou composto (C = carbono, O = oxigénio, H = hidrogénio, N = azoto, S = enxofre, Z = cinzas, W = humidade)

i - Índice de componente ($i=1,2,\dots,n$)

1 A GESTÃO DE RESÍDUOS URBANOS

O progresso económico e o desenvolvimento industrial aumentaram a utilização de recursos naturais dando origem a quantidades acrescidas de resíduos gerados. Para reduzir a utilização de recursos naturais é necessário que os resíduos sejam de alguma forma reintroduzidos no ciclo de produção, nomeadamente sob a forma de matéria-prima nova. O meio ambiente vem dando sinais da sua incapacidade de absorver todos os resíduos gerados, com isso, as políticas de gestão dos resíduos sólidos tornam-se fundamentais para melhorar a qualidade de vida da população e promover o crescimento sustentável em respeito pelo ambiente. Assim, as ações de gestão precisam ser articuladas e coordenadas entre si, porém deve destacar-se a importância das questões económicas e sociais e o crescente aumento da urbanização, pois são as principais causas do aumento dos problemas associados com a gestão dos resíduos. A gestão de RU é um processo complexo, pois envolve uma grande variedade de tecnologias e áreas científicas. Todos os processos associados à gestão de resíduos devem seguir as orientações legais e técnicas que fomentam a proteção da saúde pública e ambiente, não descurando componentes económicos e estéticos aceitáveis. Para que haja uma gestão bem-sucedida é igualmente necessária uma comunicação e interação interdisciplinares constantes e positivas (Tchobanoglous *et.al.*, 1996).

As operações de gestão de resíduos urbanos (RU) incluem diferentes etapas, entre as quais: deposição, recolha, triagem, transporte, transferência, tratamento e eliminação. De forma a avaliar os problemas principais, é necessário que haja a participação efetiva da sociedade para que se possa reduzir a eliminação de resíduos e reaproveitar os resíduos antes do destino final, e, também, é necessário exigir às empresas que estabeleçam programas para a redução dos resíduos gerados e um aproveitamento máximo de materiais recicláveis e, também uma distribuição ambiental adequada dos resíduos.

Os processos de tratamento que ocorrem no âmbito das operações de gestão de resíduos condicionam os impactos ambientais, sociais e económicos causados pelos resíduos, sendo que a sua minimização só é possível se a gestão desses resíduos ocorrer de forma integrada, ou seja tendo em conta a realidade local e temporal.

1.1 INTRODUÇÃO

A sociedade contemporânea confronta-se com uma situação limite, na qual o crescimento da população, o consumismo, as alterações das condições climáticas, a degradação ambiental e as novas desigualdades sociais são agravados pelo facto de vivermos num planeta limitado em termos de recursos e de espaço. A atual gestão de resíduos estabelece como prioridade a prevenção na produção de resíduos, seguida da reciclagem, valorização e incineração desses resíduos, considerando a deposição em aterro uma solução de último recurso. Os custos que estão associados a este último são cada vez mais elevados sendo uma consequência da falta de espaço para a criação de novos aterros, uma crescente preocupação em relação às águas subterrâneas que se encontram abaixo destes, a questões relacionadas com a saúde pública e a regulamentação que restringe a eliminação em aterro. Nestas circunstâncias a incineração torna-se bastante atraente como solução na gestão de resíduos, tendo vindo a ser cada vez mais considerada como uma solução alternativa à deposição em aterro.

Efetivamente a incineração permite ainda a redução do volume e peso dos resíduos (cerca de 90% e 75%, respetivamente) e possibilita, através do calor gerado na combustão, a obtenção de energia. No entanto, o processo da incineração de resíduos está associado a emissões de poluentes, que causam preocupação no que diz respeito à sua persistência no ambiente e aos efeitos e escala da dispersão.

O Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU I), aprovado em 1997, configurou-se como um instrumento de planeamento de referência na área dos resíduos urbanos (RU), com definição de metas específicas para o horizonte de 2000 e 2005, bem como objetivos quantitativos para 2010, no qual foram ainda definidas orientações para a concretização de um conjunto de ações a implementar na área da gestão dos resíduos sólidos urbanos e para o período 1997 a 2005, nomeadamente:

- O encerramento de mais de 300 lixeiras inventariadas;
- A construção de infraestruturas para o tratamento de resíduos sólidos urbanos;
- O reforço acentuado da recolha seletiva e da reciclagem multimaterial,

O PERSU forneceu ainda linhas de orientação geral para a criação dos fluxos especiais de gestão, abrindo caminho à criação de legislação específica e à constituição e licenciamento das respetivas entidades gestoras. As metas propostas são de prevenção de resíduos, redução, reutilização, reciclagem, outros tipos de valorização, e por fim a eliminação dos resíduos (Lipor, 2009).

Em 2012 foram produzidas em Portugal $4,53 \times 10^6$ toneladas de resíduos urbanos, menos 650 mil toneladas que em 2010, o que representa um decréscimo de cerca de 12% da produção de resíduos urbanos no Portugal Continental em comparação com o ano 2010, Figura 1.1. Supostamente devido a crise económica que o país atravessa nota-se uma tendência de diminuição da produção de resíduos para o nível dos valores dos anos 2005-2006. Resultando da diminuição da captação diária por habitante anual.

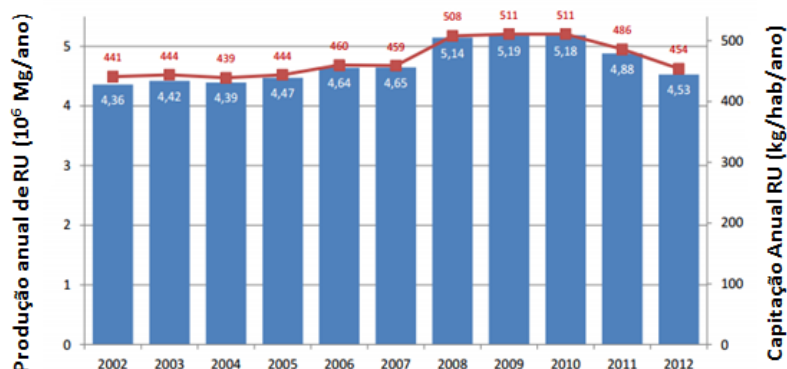


Figura 1.1 - Evolução da produção e da captação dos resíduos urbanos em Portugal Continental [Fonte: PERSU 2020, 2013].

De acordo com a Figura 1.2 pode verificar-se que com a aplicação da gestão dos resíduos, em Portugal, estes têm diminuído em aterros, para o ano 2012 em comparação com 2011, a percentagem do resíduo depositado em aterro, desce de 59% para 54%, enquanto o valor de 21% para valorização energética, com recuperação de energia e a restante fração encaminhada para valorização orgânica ou material. Neste âmbito há a salientar uma ligeira redução da fração depositada diretamente em aterro (RARU (2011), PERSU II, (2013)).

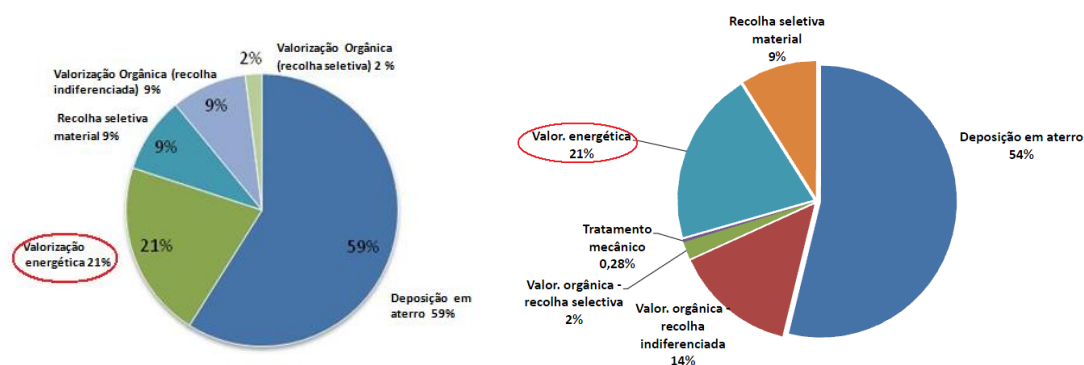


Figura 1.2 - Gestão de RSU para o ano 2011 – 2012 [Fonte: APA, 2013].

1.2 CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS URBANOS

De acordo com a Lei-quadro dos resíduos (DL n.º 73/2011 de 17 de Junho, que republica o Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, em Portugal define o resíduo urbano como o resíduo proveniente de habitações bem como outro resíduo que, pela sua natureza e composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações.

A Portaria n.º 851/2009 de 7 de Agosto inclui requisitos relativos a caracterização física de resíduos urbanos, por componente (e.g., bio-resíduos, papel e cartão, vidro, plástico, entre outros) dos resíduos recolhidos.

O resíduo urbano é um material heterogéneo e a sua composição física depende do nível socioeconómico e das condições climáticas. A composição física do resíduo urbano refere-se aos componentes nomeadamente resíduos alimentares, papel/cartão, têxteis, plásticos, vidros, metais, entre outros. A caracterização física dos RU não é apenas importante em termos quantitativos, mas também a sua composição qualitativa é fundamental para determinar o sistema de gestão e o método de tratamento.

A composição dos resíduos urbanos em Portugal referente ao ano 2011 vem indicada na Figura 1.3 (APA, 2013).

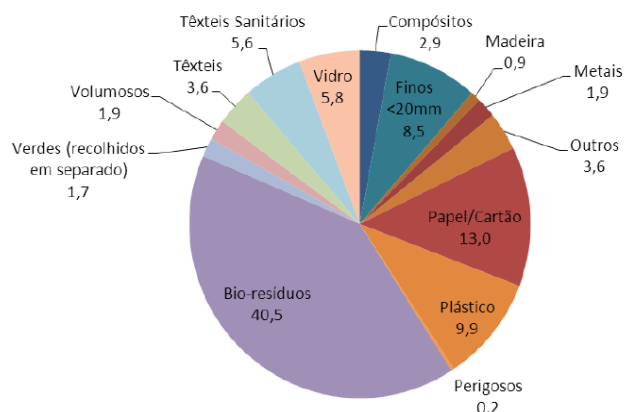


Figura 1.3 - Caracterização física média dos RU produzidos Portugal Continental em 2011 [Fonte: APA, 2013].

A composição dos RU, realizada com base nas especificações técnicas da Portaria n.º 851/2009, de 7 de agosto, inclui os bio-resíduos com um valor de aproximadamente 40%, seguido pelo papel/ cartão com 13%, plástico na ordem dos 10%, resíduos finos 8,5%, vidro e têxteis sanitários na ordem dos 5% cada, têxteis e compósitos que se apresentam com 3,6 e 2,9% respetivamente, os metais, os resíduos volumosos, os resíduos verdes e

os resíduos de madeira estão na faixa dos 0,9 aos 1,9% sendo que ainda há cerca de 3,6% de resíduos classificados como outros.

A Figura 1.4 dá-nos a informação da percentagem de resíduos para o ano 2011 que foram usados para a produção energética, sendo de salientar que apenas 24% são resíduos de embalagens e 76% são de outros resíduos não especificados, os 24% dos resíduos de embalagem estão divididos em: 2% de metais, 6% de papel/ cartão, 10% de plástico e 6% de vidro.

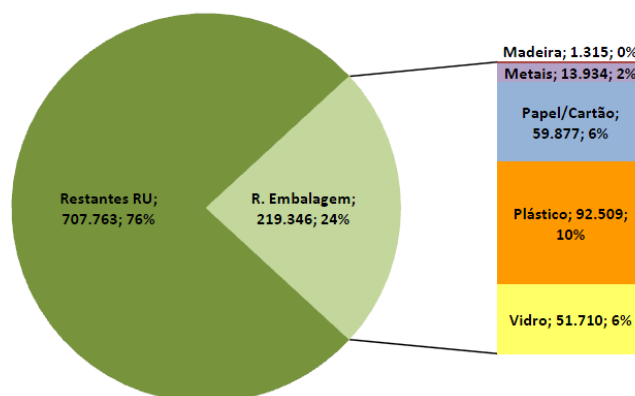


Figura 1.4 - Resíduos encaminhados para valorização energética (RU) e distribuição dos diferentes tipos de resíduos por material (ton) [Fonte: RARU, 2011].

O aumento da diversidade de substâncias e materiais que constituem um determinado resíduo geralmente ocasionam uma redução das respetivas possibilidades de valorização. Quando se conhece as características de um resíduo (ou seja a natureza do resíduo expressa em termos nas propriedades físicas, químicas, biológicas), é possível avaliar o seu potencial de aproveitamento (subproduto) e as consequências resultantes do seu desaproveitamento. A classificação dos resíduos é feita com base na origem e na natureza. Também é possível avaliar quantitativa e qualitativamente as consequências, positivas e/ou negativas para o ambiente, a partir da metodologia da avaliação do ciclo de vida do mesmo (Santos J., 2007).

A necessidade de gerir de forma sustentável o diversificado grupo de substâncias consideradas como RU, levou a criação de fluxos específicos de resíduos, que não representa nada mais do que a categoria de resíduos cuja proveniência é transversal as várias origens ou setores de atividade, sujeitos a uma gestão específica (DL nº 73/2011).

De acordo com o DL nº 73 de 2011 de 17 de Junho, definem-se em conformidade com a Tabela 1.1:

Tabela 1.1 - Tipos de resíduos [Adaptado DL nº 73/2011].

Classificação	Caraterísticas
Resíduos agrícolas	Provenientes de exploração agrícola e ou pecuária ou similar
Resíduos de construção e demolição	Provenientes de obras de construção
Resíduos hospitalares	Resultantes de atividades de prestação de cuidados de saúde a seres humanos ou a animais, nas áreas de prevenção, diagnóstico, tratamento, reabilitação ou investigação e ensino, bem como de outras atividades envolvendo procedimentos invasivos, tais como acupuntura, piercings e tatuagens
Resíduos industriais	Gerados em processos produtivos industriais, bem como o que resulte das atividades de produção e distribuição de eletricidade, gás e água.
Resíduos urbanos	Provenientes de habitações bem como o outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações
Resíduos inertes	Que não sofre transformações físicas, químicas ou biológicas importantes e, em consequência, não pode ser solúvel nem inflamável nem ser qualquer outro tipo de reação física ou química, e não pode ser biodegradável, nem afetar negativamente outras substâncias com as quais entre em contato de forma suscetível de aumentar a poluição do ambiente ou prejudicar a saúde humana, e cuja lixiviabilidade total, conteúdo poluente e ecotoxicidade do lixiviado são insignificantes e, em especial, não põem em perigo a qualidade das águas superficiais e ou subterrâneas.
Resíduos perigosos	Resíduos que apresente uma ou mais das características de perigosidade, mais concretamente que seja classificado como explosivo, comburente, cancerígeno, corrosivo, infeccioso, tóxico para a reprodução, mutagénico, sensibilizante, ecotóxico, que em contato com água, o ar ou um ácido libertam ases tóxicos ou muito tóxicos e substâncias suscetíveis de após eliminação darem origem a outra das substâncias anteriormente referenciadas.

1.3 A INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS URBANOS

A utilização de tecnologias para tratamento de resíduos que se baseiam na possibilidade de recuperar energia a partir dos resíduos tem elevada importância tendo um especial impacto na utilização de recursos. Neste âmbito importa considerar as propriedades dos resíduos nomeadamente a origem, a composição elementar e molecular e o poder calorífico. Por exemplo a presença de compostos combustíveis nos resíduos com origem na biomassa tem um particular interesse pois poderão estar associadas à comercialização de carbono, o que contribui para uma solução sustentável na gestão dos

mesmos. Podem ser incinerados os RU indiferenciados, ou que sofreram uma triagem prévia, denominados de CDR, aos quais foram removidos os materiais com menor poder calorífico, nomeadamente putrescíveis e inorgânicos (vidros, metais) (Consoni S. *et al.*, 2005). Também podem ser aceites resíduos provenientes da recolha seletiva que apresentem um elevado poder calorífico, tais como os resíduos de plástico e de papel, desde que este tipo de operação (incineração) apresente uma maior viabilidade comparativamente com a reciclagem. Este processo pode mesmo vir a ser utilizado estrategicamente de forma a erradicar lixeiras, antigos aterros e incentivar o desenvolvimento de soluções sustentáveis para os problemas de deposição final de resíduos urbanos encontrados nos países em vias de desenvolvimento.

1.3.1 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

No âmbito das tecnologias mais recentes, o processo de incineração desenrola-se em duas fases. Uma vez introduzidos na câmara de incineração primária, o resíduo sólido é inicialmente seco, a seguir desvolatilizado e finalmente incinerado, geralmente sobre um suporte de grelhas, atingindo uma temperatura de cerca de 900 °C, do que resulta um resíduo sólido incinerado (escória) e uma mistura de gases e pequenas partículas. A alimentação de oxigénio na câmara primária é próxima da estequiometria, evitando-se assim temperaturas demasiado elevadas e reduzindo a turbulência ao mínimo indispensável. Nestas condições de oxidação controlada, reduz-se a volatilização de certos metais que ocorrem nos resíduos, tais como chumbo, cádmio, cromo, mercúrio, entre outros, e minimizando ainda a formação de óxidos de azoto, que surgem apenas na presença de temperaturas mais elevadas, e a emissão de partículas volantes.

Enquanto as escórias são descarregadas para um cinzeiro, os gases resultantes da combustão primária, eventualmente contendo produtos de combustão incompleta, são depois sujeitos à adição de mais ar de combustão (ar secundário), na chamada câmara secundária (*afterburner*), onde a atmosfera é oxidante de forma a garantir um excesso de ar entre 50 a 75% e em que as temperaturas não devem ser inferiores a 850 °C podendo atingir 1250 °C, por forma a garantir a destruição completa dos produtos gasosos de combustão primária, nomeadamente de moléculas como dioxinas, furanos e PAH's,

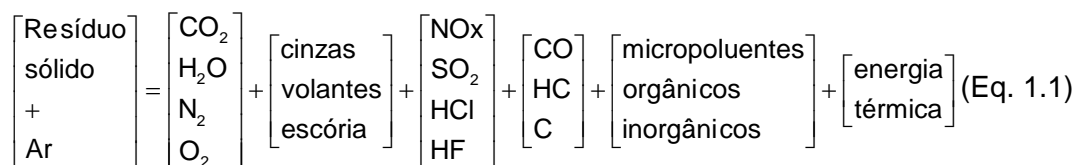
O tempo de residência dos resíduos sólidos na grelha (primeira fase) é de cerca de 30 a 45 minutos enquanto que o tempo de residência dos produtos gasosos presentes na câmara secundária (segunda fase) deve ser de, no mínimo, 2 segundos para que ocorra a combustão completa destes (Matos, M.A.A., 2011).

O ar secundário é adicionado na câmara secundária por injetores acima da massa em combustão. O ar secundário promove a turbulência (mistura) e reduz as emissões de inqueimados (fuligem, CO, HC).

O efluente gasoso que resulta da segunda fase da incineração e após arrefecimento, é sujeito a um conjunto de processos de controlo de poluentes atmosféricos, nomeadamente de remoção dos gases ácidos num reactor (lavador húmido, ou semi-seco), de remoção de partículas (precipitador eletrostático, ou filtro de mangas), de remoção de óxidos de azoto (por adição de NH_3) e de controlo de emissão de PAH's e Hg (adição de carvão ativado) antes de serem enviados para a atmosfera via chaminé.

A energia térmica que se liberta do processo de incineração dos resíduos é recuperada a partir do arrefecimento dos gases de combustão por transferência de calor sensível para um fluido operante, geralmente a água, produzindo vapor a alta temperatura e alta pressão, após o que é sujeito a expansão numa turbina para gerar energia mecânica.

A Eq.1.1 descreve a reação química da incineração (Matos, M.A.A., 2011), isto é de conversão de reagentes em produtos:



1.3.2 CONDIÇÕES LEGAIS

Utilizada como um método para tratamento final de resíduos, a incineração consiste no processamento termoquímico de resíduos com recuperação ou não de energia. Para este efeito é necessário dispor de infra-estruturas onde este processo possa ocorrer de acordo com as normas legais que estão fixadas na legislação. A incineração é regulamentada pelo DL nº 85/2005 de 28 de Abril, que transpõe a Diretiva nº 2000/76/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho de 4 de Dezembro, sendo definida como instalação de incineração qualquer unidade e equipamento técnico, fixo ou móvel, dedicado ao tratamento térmico de resíduos, com ou sem recuperação da energia térmica gerada pela combustão, incluindo a incineração de resíduos por oxidação e outros processos de tratamento térmico, como a pirólise, a gaseificação ou os processos de plasma, desde que as substâncias resultantes do tratamento sejam subsequentemente incineradas.

1.3.2.1 OPERAÇÃO

De acordo com o DL nº 85/ 2005, as instalações de incineração e devem ser concebidas, equipadas, construídas e exploradas de modo a permitir que, após a última injeção de ar de combustão, os gases resultantes do processo atinjam, de forma controlada e homogénea, mesmo nas condições menos favoráveis, uma temperatura de 850° C medida próximo da parede interior ou noutro ponto representativo da câmara de combustão durante, pelo menos, dois segundos.

As instalações de incineração de resíduos devem possuir e ter em funcionamento um sistema automático que impeça que a alimentação de resíduos seja feita nas seguintes condições: 1) no estágio do arranque antes que a temperatura atinja no mínimo 850 °C (ou 1100 °C no caso de resíduos perigosos), 2) sempre que a temperatura durante a operação baixe a valores inferiores a 850 °C (ou 1100 °C no caso de resíduos perigosos); 3) sempre que as medições contínuas indiquem que foram excedidos os valores limites de emissão que resultem de perturbações ou avarias dos dispositivos de tratamento.

Os locais para as instalações e as áreas que estão associadas ao armazenamento de resíduos devem ser concebidos e explorados de forma a prevenir a libertação não autorizada e acidental de substâncias poluentes para o solo, águas superficiais e subterrâneas de acordo com as leis aplicáveis. Devem ainda ter-se em conta a capacidade destes locais para armazenamento das águas de chuva contaminadas que ali escorram ou para as que resultem de derrames ou de operações de combate a incêndios e ainda que estas águas possam ser analisadas e tratadas antes da sua descarga ou envio para o destino final.

A exploração das instalações de incineração deve realizar-se de forma a o nível de incineração permita que o teor de COT das escórias e das cinzas seja inferior a 3% ou que a sua perda por combustão se encontre abaixo dos 5% de peso do material. Para tal é necessário a aplicação de técnicas adequadas ao tratamento prévio dos resíduos.

Todo o calor que resulte de incineração e de co-incineração deve ser sempre que possível, recuperado.

As instalações de incineração devem ser concebidas, equipadas, construídas e exploradas de modo a que os valores limites de emissão (VLE) previstos no anexo V do presente diploma não sejam excedidos durante os períodos de tempo neles referidos.

1.3.2.2 MONITORIZAÇÃO

A emissão de poluentes para a atmosfera deve ser feita de uma forma controlada usando um chaminé a qual tem a altura calculada de forma a salvaguardar a saúde humana e ambiental de acordo com a legislação aplicada.

De acordo com o DL nº 85/ 2005, a monitorização dos efluentes gasosos deve ser efetuada nas instalações de incineração ou co-incineração, de acordo com as técnicas estabelecidas no anexo III do referido decreto e de acordo com os seguintes requisitos:

- a) Monitorização em contínuo de *NO*, desde que os valores limites estejam estabelecidos, *CO*, partículas totais, *COT*, *HCl*, *HF* e *SO_x*, (...).
- b) Monitorização em contínuo dos seguintes parâmetros operacionais do processo nomeadamente: i) Temperatura próximo da parede interna ou de outro ponto representativo da câmara de combustão, nos termos averbados na autorização da instalação; ii) Concentração de oxigénio, pressão, temperatura e teor em vapor de água dos efluentes gasosos.
- c) Monitorização pontual de metais pesados, dioxinas e furanos, a realizar pelo menos duas vezes por ano, com um intervalo mínimo de dois meses entre medições (...).

1.3.3 MELHORES TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS

A incineração direta ou em massa (*mass-burning*), que é correntemente usada para a combustão dos resíduos tal e qual como são recolhidos, apresenta vantagens e desvantagens como indica a Tabela 1.2.

Neste âmbito, a incineração de resíduos em massa permite recuperar energia e alguns materiais a partir das escórias. Esta operação de tratamento de resíduos não é por si própria uma operação de eliminação de resíduos, já que em certas condições poderá ser considerada uma operação de valorização, como se verá mais adiante.

Ainda sob o ponto de vista ambiental, o facto de os resíduos apresentarem um conteúdo em carbono de base biodegradável (papel, biomassa) permite obter “eletricidade verde” do processo de incineração, ou seja permite poupar recursos energéticos fósseis, muitas vezes expresso como poupanças de *CO₂-eq.* no âmbito da Avaliação de Ciclo de Vida (PERSU II, 2007).

Tabela 1.2 - Vantagens e desvantagens da incineração em massa [IPPC, BREF, 2006].

Vantagens	Desvantagens
Redução dos resíduos em cerca de 70% em massa e 90% em volume;	Alguns materiais podiam ser mais valorizados por via da reciclagem;
Destruição dos agentes patogénicos, contaminantes orgânicos sem recorrer a reações biológicas, e destruição em massa sem que haja recolha seletiva ou pré- tratamento	Se as condições de operação não forem as mais adequadas, este processo pode ser uma fonte muito significativa de dioxinas e furanos e de metais como As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg;
Valorização energética, o que pode tornar os custos de operação muito baixos;	São produzidos resíduos sólidos considerados perigosos.
Unidades de incineração podem ser construídas perto das grandes fontes de produção de RSU, reduzindo os custos de transporte;	
O controlo das emissões gasosas garante os valores limites de emissão;	

O processo da incineração de resíduos não é novo, uma vez que nos últimos 50 anos, países industrializados têm vindo a usar cada vez com mais frequência devido às limitações de locais disponíveis para a construção de novos aterros uma vez que estes países têm elevada densidade populacional. As tecnologias de incineração evoluíram bastante desde os anos 80, conseguindo-se desempenhos excelentes ambientais em especial ao nível da poluição do ar, tornando este processo muito atrativo no contexto da gestão de recursos, em particular quando atinge eficiências superiores a 65% de acordo com a designada fórmula R1.

A tecnologia de incineração de resíduos é atualmente objeto de uma BAT (Best Available Technology) que descreve a tecnologia de incineração de resíduos mais eficiente e avançada, tendo em conta a efetiva necessidade, a localização, a tecnologia, as condições de operação e o controlo. Todas as vantagens e desvantagens têm que ser consideradas em conjunto, nomeadamente: fatores ambientais locais, a natureza dos resíduos e os impactos dos resíduos nas estruturas de gestão, o custo e possibilidade de implementação de processos alternativos tendo em conta as suas vantagens potenciais, os custos e benefícios das opções de valorização ou eliminação dos resíduos que são produzidos na instalação, a existência de mercado para a energia que é recuperada (eletricidade e calor), os custos de capital para investimento, a disponibilidade do local, a rede de transporte de resíduos para a instalação, entre outros.

As condições de operação e controlo que a BAT refere para a incineração de resíduos e em particular de resíduos perigosos, inclui as seguintes (IPPC,BREF, 2006):

- Ter em conta o tipo de resíduos a receber (urbanos, industriais, outros);
- Fazer uma adequada manutenção do local;
- Manter os equipamentos em boas condições de funcionamento e com inspeções regulares;
- Estabelecer e manter controlo de qualidade aquando da entrada de resíduos;
- Verificar, amostrar e analisar os resíduos recebidos;
- Dispor de detetores de materiais radioativos;
- Armazenar resíduos de acordo com as suas propriedades e com os riscos associados;
- Controlar do tempo de armazenamento dos resíduos;
- Minimizar os odores libertados das áreas de armazenamento e das áreas de pré-tratamento;
- Evitar a sobrecarga de armazenamento de resíduos;
- Segregar os resíduos tendo em conta a sua natureza (composição química, suas características físicas e biológicas);
- Rotular claramente e corretamente os resíduos;
- Existir um plano de prevenção, deteção e controlo de riscos;
- Controlar a entrada de ar para a câmara de combustão;
- Otimizar e controlar as condições de combustão;
- Fazer uso dos queimadores auxiliares para garantir as condições de funcionamento da incineração sempre que necessário;
- Fazer uso adequado da fornalha (carga por unidade de área, temperatura, velocidade de movimentação, admissão de ar primário);
- Escolher uma turbina de acordo com o modelo de recuperação de energia contratado (produção de energia mecânica e/ou recuperação calor para aquecimento);
- Utilizar de sistemas separados para a drenagem, tratamento e descarga de águas (pluviais, doméstica e de processo industrial);
- Separação dos metais e não metais ferrosos;
- Tratar as cinzas;
- Implementar medidas de redução de ruído.

1.4 A INCINERAÇÃO COMO OPERAÇÃO DE GESTÃO DE RESÍDUOS

O regime jurídico de gestão de resíduos foi aprovado pela primeira vez em Portugal através do DL nº 488/85 de 25 de Novembro. Como Portugal assumiu compromissos comunitários foi necessário aumentar a exigência de forma que se atingisse os objetivos ambientais e limitar o volume de resíduos que poderiam ser depositados em aterro. Foi então fundamental o crescimento em termos de instrumentos técnicos, jurídicos e económicos que se garantisse que os resíduos não constituíam perigo e não causavam prejuízo na saúde humana ou ao ambiente. Assim, a legislação comunitária relativa a regras gerais de gestão de resíduos foi alterada para o Decreto-Lei nº 178/2006 de 5 de Setembro, também conhecida como Lei – Quadro dos resíduos que se encontra republicada pelo DL nº 73/2011 de 17 de Junho atualmente em vigor.

De acordo com o DL nº 178/2006 de 5 de Setembro - os resíduos urbanos são os resíduos domésticos ou outros resíduos semelhantes, nomeadamente os provenientes do sector de serviços ou de estabelecimentos comerciais ou industriais e de unidades prestadoras de cuidados de saúde, desde que, em qualquer dos casos, a produção não exceda 1 100 litros por produtor (APA, 2013). Em síntese, neste documento há alguns aspetos relevantes para o seguimento dos objetivos da política dos resíduos, tendo como objetivo minimizar a produção de resíduos, racionalizar a sua gestão através da introdução de mecanismos de regulação por parte das entidades públicas, simplificar os procedimentos, contribuir para maior sustentabilidade e cidadania ambiental. A preferência deverá ser sempre dada à reutilização seguida da reciclagem que por sua vez precede a incineração e a valorização em relação à eliminação final em aterro sanitário. A política nacional de resíduos apoia a promoção destes como recurso de materiais e energia, tendo como pressuposto de que a sustentabilidade se promove pela maximização da retenção dos recursos naturais em uso na economia e seu adequado tratamento e valorização antes de serem devolvidos ao ambiente. No campo dos custos inerentes a gestão de resíduos, é enfatizado o princípio do “poluidor-pagador”, como forma de responsabilizar os produtores ou detentores de resíduo (Lipor, G.A., 2009). Construindo um procedimento para elaboração e revisão dos planos de gestão, criando a Autoridade Nacional dos Resíduos (ANR) e as Autoridades Regionais dos Resíduos (ARR) e determinando a necessidade de um plano nacional de gestão de resíduos, de planos específicos para os resíduos (industriais, urbanos, agrícolas e hospitalares) e de planos municipais de gestão de resíduos urbanos (PERSU II, 2010).

As Diretivas Europeias desempenham um papel importante na regulamentação do desenvolvimento da gestão sustentável de resíduos. Este quadro legal torna a Europa o maior impulsionador do processo de incineração, com o maior nível de regulamentação, e também promotor das tecnologias avançadas e com riscos diminuídos.

A incineração de resíduos é um processo de tratamento final de resíduos que está contemplado no âmbito das operações de gestão de resíduos, conforme prevê a lei-quadro dos resíduos: DL nº 73/2011 de 17 de Junho, devendo decorrer no âmbito das condições de licenciamento e operação previstas pelo DL nº 85/2005 de 28 de abril. Transpondo a Diretiva Europeia n.º 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro, a lei-quadro dos resíduos vem clarificar conceitos chave, tais como: as definições de resíduo, as operações de gestão (prevenção, reutilização, preparação para a reutilização, tratamento e reciclagem, a distinção entre os conceitos de valorização e eliminação de resíduos), os conceitos de fim-de-resíduo e de subproduto, com base na hierarquia da gestão mas alicerçada numa diferença efetiva em termos de impacte ambiental, medida através de ferramentas como a avaliação de ciclo de vida (ACV).

A mesma lei-quadro prevê contudo dois regimes para a incineração: ou como operação de eliminação ou como operação de valorização, dependendo da eficiência do processo de recuperação de energia que o sistema considere e tenha implementado (ver Anexo II do DL nº 73/2011).

A larga maioria dos sistemas modernos de incineração contempla a recuperação de energia mecânica, geralmente sob a forma de eletricidade, mas apenas uma pequena minoria tem condições de recuperar calor pelo que, em alternativa, é simplesmente descartado no ambiente. Em qualquer caso a recuperação de energia a partir dos resíduos é sem dúvida uma forma de poupar recursos naturais, em particular quando estes deixam de poder ser valorizados sob o ponto de vista material, tendo em conta o estado de degradação em que se encontram ou a inexistência de oportunidades de valorização material, ou seja o custo económico ou ambiental.

1.5 VALORIZAÇÃO VS ELIMINAÇÃO DE RESÍDUOS

A incineração de resíduos dá origem à formação de escórias e energia térmica que podem ser sujeitos a recuperação.

1.5.1 A RECUPERAÇÃO MATERIAL EM PROCESSOS DE INCINERAÇÃO

Do processo de combustão que se realiza na incineração, resultam dois tipos de resíduos sólidos: as escórias e as cinzas. Das escórias, é ainda possível separar as sucatas ferrosas, através da utilização de separadores eletromagnéticos, permitindo, assim, o encaminhar estas para o circuito da reciclagem de uma quantidade significativa de metais ferrosos, a quantidade total de metais que entra na câmara de combustão é apenas redistribuída nos efluentes do processo, ou seja, nos sólidos (escórias), nos gases e nos efluentes líquidos (pouco significativos neste processo).

A recuperação de material metálico nos resíduos sólidos é importante para a área da reciclagem e para a recuperação de energia, tendo um impacto sobre as emissões. A Tabela1.3 apresenta a informação relativamente aos materiais que se podem encontrar nas cinzas e a sua percentagem. Os componentes mais abundantes das cinzas são: vidro, minerais, metais ferrosos e metais em geral com uma abundância em massa dada entre a 26,2% e as 16,1%.

A incineração de resíduos permite ainda a recuperação do material incinerado, na forma de escória, que em vez de serem postas em aterro, podem ser aproveitados em processos na construção de enchimento de aterro na construção de estradas ou outros projetos.

Tabela1.3 - Teor de materiais encontrados nas cinzas dos resíduos incinerados [Fonte: adaptado de Worrel W., 2010].

Material	Percentagem ponderal (%)
Metais	16,1
Inqueimados	4,0
Metais ferrosos	18,3
Metais não ferrosos	2,7
Vidro	26,2
Cerâmicas	8,3
Minerais, cinzas e outros	24,1

1.5.2 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

A energia térmica libertada no processo de incineração pode ser recuperada sob forma de calor e depois convertida em utilidades, nomeadamente energia mecânica e/ou calor

de processo. O sistema de recuperação de energia térmica de uma unidade de incineração de resíduos inclui, genericamente, uma caldeira, uma turbina, um condensador e uma bomba. A caldeira produz vapor a alta pressão, que em seguida é expandido nos conjuntos de turbinas (de alta, de média, e baixa pressão) convertendo o trabalho mecânico de expansão do vapor de água em trabalho de mecânico de veio na turbina, que, quando acoplada a um gerador elétrico, onde, por efeito eletromagnético, é convertida em energia elétrica que pode ser usado internamente ou introduzido na rede de distribuição de energia elétrica. O vapor de baixa pressão e temperatura entra em contato com a fonte fria, sofrendo condensação e reduzindo drasticamente o seu volume. A água em estado líquido em seguida é admitida a uma bomba que eleva a pressão da água aos valores de operação da caldeira. Trata-se do ciclo termodinâmico de Rankine.

1.6 EFICIÊNCIA DA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA - FÓRMULA R1

A operação de incineração com recuperação de energia e materiais não garante tratar-se de uma operação de valorização; pelo contrário a incineração é geralmente uma operação de eliminação de resíduos e só em casos em que a eficiência de conversão é suficientemente elevada é que poderá ser considerada uma operação de valorização. Esta distinção é objeto de clarificação da última Diretiva Quadro dos Resíduos (Anexo II da Diretiva nº 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Novembro de 2008) e (Anexo II do DL nº 73/2011 de 17 de Junho) que define o nível mínimo de eficiência energética de conversão de energia R1, expresso numa base anual (aqui designada abreviadamente como fórmula R1). A investigação mostra uma correlação entre os valores da R1 e o tipo de recuperação de energia, o tamanho da instalação de incineração e a localização geográfica respetivamente.

Em relação ao cálculo da eficiência energética de acordo com a fórmula R1, Portugal em 2010 propôs à Comissão Europeia que a referida fórmula deveria apresentar uma correção climatérica baseada no número de dias de calor do ano (de acordo com o EUROSTAT). Legalmente isto é possível (art.38 (1) da WFD) que atende às condições climáticas locais, quer para a produção de aquecimento quer de arrefecimento; nestas circunstâncias em vez de produção de calor os países do Sul da Europa poderiam produzir frio. Neste âmbito alguns projetos promissores estão a ser desenvolvidos em Madrid e Brescia (Stengler, 2010).

A fórmula R1 aplica-se às instalações de incineração de resíduos e traduz a eficiência energética dessa instalação para o efeito de avaliação dessa instalação relativamente à

natureza da operação: valorização ou eliminação. A fórmula R1 é utilizada para calcular a eficiência energética de uma instalação de incineração ou co-incineração dos resíduos em geral, não só para resíduos sólidos urbanos ou resíduos urbanos indiferenciados. Realizam operações de valorização as instalações de incineração resíduos sólidos urbanos apenas quando a sua eficiência energética é igual ou superior aos seguintes valores:

- 0,60 para instalações em funcionamento e licenciadas nos termos da legislação comunitária aplicável antes de 1 de Janeiro de 2009,
- 0,65 para instalações licenciadas após 31 de Dezembro de 2008, por recurso a formula:

$$\text{Eficiência Energética R1} = \left(\frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97(E_w + E_f)} \right) \quad (\text{Eq. 1.2})$$

Ep representa a energia anual produzida sob a forma de calor ou eletricidade. É calculada multiplicando por 2,6 a energia sob a forma de eletricidade e por 1,1 o calor produzido para uso comercial (GJ/ano).

Ef representa a entrada anual de energia no sistema a partir de combustíveis que contribuem para a produção de vapor (GJ/ano).

Ew representa a energia anual contida nos resíduos tratados calculada utilizando o valor calorífico líquido dos resíduos (GJ/ano).

Ei representa a energia anual importada com exclusão de Ew e Ef (GJ/ano).

0,97 é um fator que representa as perdas de energia nas cinzas de fundo e por radiação. Esta fórmula é aplicada nos termos do documento de referência sobre as melhores técnicas disponíveis para a incineração de resíduo (IPPC, BREF, (2006), EC, EDG, (2011), Reimann, (2012)).

O cálculo da eficiência energética nas unidades incineradoras utiliza-se na verificação da recuperação de energia a partir de resíduos. Desta forma e tendo em conta a Figura 1.5, define-se que *inputs* energéticos são aqueles necessários para o funcionamento da incineradora sem incluir a energia necessária para a recolha e transporte de resíduos e o eventual pré-tratamento necessário ao processo. Outro *input* é a eletricidade, gás natural e/ou os combustíveis usados para alimentar os queimadores auxiliares, desde que estes sejam usados parcial ou totalmente para que se atinja o nível de energia necessária para o processo incineração. Ao longo deste processo há a conversão de energia a partir dos

resíduos utilizados que sofrem este processo no incinerador e esta energia resultante é usada em *output* ou na circulação no interior do sistema.

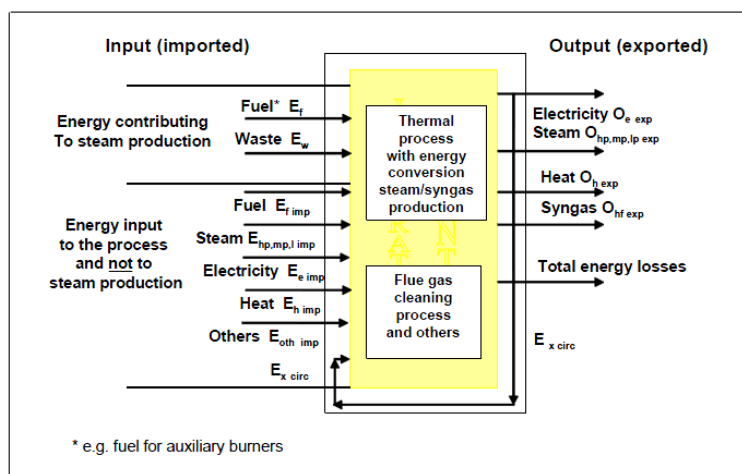


Figura 1.5 - Fronteira do sistema de eficiência energética [Fonte: IPCC, BREF, 2006].

Os *outputs* energéticos são aqueles que resultam do processo de incineração sendo que só se exclui desta energia aquela que é distribuída e consumida internamente através de dissipações necessárias para executar o processo. Tem-se em conta ainda a energia que é usada para outros processos, como secagem, aquecimento, entre outros. Para o efeito de cálculo da fórmula R1 são consideradas todas as entradas de energia para o processo de incineração incluindo também o tratamento do efluentes gasosos, sob forma de eletricidade, combustíveis fósseis, e energia do resíduos a incinerar, sendo considerado o poder calorífico do resíduo. Os *inputs* e *outputs* do processo de incineração e de tratamento dos efluentes gasosos são apresentados na Figura 1.5.

A energia de distribuição é considerada como dissipações, correspondendo a energia (por exemplo, vapor / calor / eletricidade), que é então usada no próprio processo. Essa energia não é considerada como uma entrada do sistema, porque não foi importado de fora da fronteira do sistema. No entanto, considera-se importante que essa circulação (se ele está fornecendo as perdas de energia) deve ser identificada (como substituir a energia importada) e deve, portanto, ser incluído na lista de verificação.

Na Tabela 1.4 apresenta-se a eficiência energética estimada através da fórmula R1 (ver Eq.1.2) das unidades de incineração para os países da Europa comunitária. Como se vê os países nórdicos apresentam eficiências superiores, devido ao maior aproveitamento do calor do processo de incineração para aquecimento centralizado (*district heating*). (IPPC, BREF, (2006), Grosso M., et al., (2010)).

Tabela 1.4 - Eficiência de recuperação de energia calculada através da fórmula R1 [Fonte: adaptada de Grosso M. *et al.*, 2010].

País	Número de incineradoras existentes	Número de incineradoras existentes com dados suficientes disponíveis	Percentagem de incineradoras existentes com dados suficientes disponíveis (%)	Eficiência média de recuperação de energia (fórmula R1)
Grã- Bretanha	22	2	9	-
Austria	9	4	44	-
Bélgica	18	8	44	-
França	127	57	45	-
Portugal	3	2	67	0.49
Suíça	30	20	67	0.54
Espanha	10	7	70	0.48
Alemanha	68	53	78	0.49
Itália	51	42	82	0.37
Suécia	30	25	83	1.06
Dinamarca	34	31	91	1.04
Noruega	13	12	92	0.87
República Checa	3	3	100	0.85
Finlândia	1	1	100	0.77
Hungria	1	1	100	0.38
Países Baixos	11	11	100	0.55
Total	431	279	65	0.66

No que diz respeito à recuperação de calor em função das condições de operação da caldeira (com 80-90 % de calor recuperado), o rendimento elétrico do ciclo pode atingir 25%, no caso do vapor produzido a uma pressão de 60 bar e com a temperatura de 420 °C. Com uma tecnologia mais evoluída, e considerando uma produção de vapor a uma pressão de 80 bar e uma temperatura de 500 °C, a eficiência pode atingir os 30% (IPPC, BREF, 2006). Entretanto a taxa de conversão de energia produzida nas unidades de incineração com recuperação de energia a partir de resíduos é menor do que nas centrais térmicas à base de combustíveis fósseis, pois as medidas anticorrosivas deterioram os parâmetros do vapor e não permitem a recuperação de energia dos produtos de combustão até temperaturas tão baixas. Por isso o vapor é gerado a 40 bar, à temperatura de 400°C, sendo que uma pressão e uma temperatura mais elevadas contribuem para uma maior corrosão das instalações e custos de manutenção acrescidos.

Citando (Teibert C., 2006) neste âmbito, verifica-se que algumas das unidades de incineração com dispositivos de recuperação de energia melhorados (por exemplo a unidade de Rudersdorf perto de Berlim e a MSWI de Amesterdão com quatro linhas de incineração com um caudal nominal de 25 ton / h, com uma capacidade total de 800 mil ton / ano) alcançaram um rendimento energético bruto de 30%, e através da aplicação da fórmula R1 de avaliação da eficiência energética, atingiram um índice de recuperação de energia de 78% tendo apenas em conta a produção de energia elétrica com a aplicação do fator de 2,6 proposto, sem fazer uso do calor remanescente. Assim, este tipo de instalações alcança o valor de referência de 60% indicado pela Comissão. De facto tal rendimento é possível desde que o ciclo disponha de reaquecimento (ver Figura 1.6).

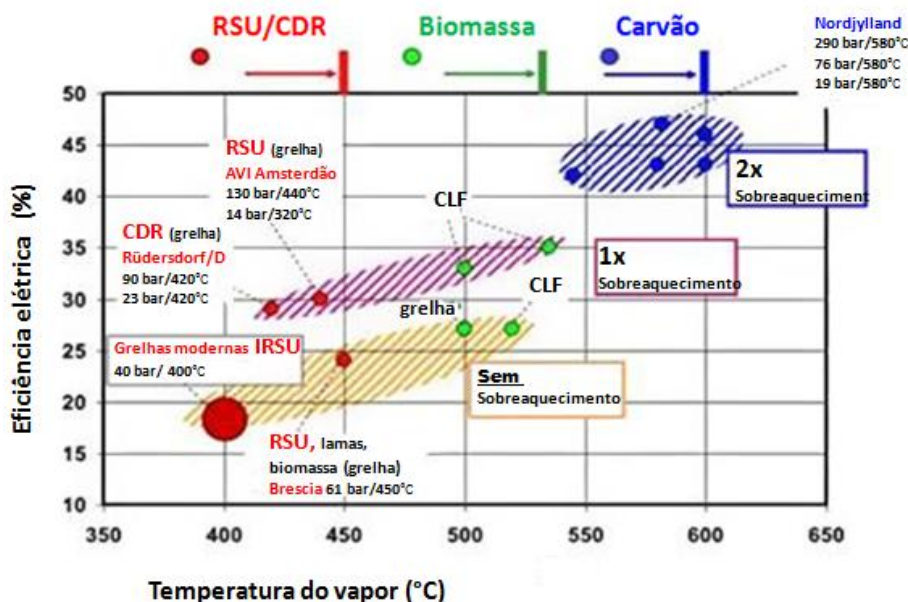


Figura 1.6 - Eficiência energética na combustão de diferentes combustíveis [Fonte: Seifert, 2012].

Reimann (2012) analisando as unidades de incineração da comunidade europeia desde 2001 por um período de 3 anos, elaborou relatórios do desempenho energético das unidades incineradoras de resíduos no âmbito da fórmula R1.

Os resultados desta investigação (ver Figura 1.7) mostram claramente uma forte correlação entre os valores de R1 com parâmetros tais como: tipo de recuperação de energia (eletricidade, calor ou ambos), o tamanho da unidade de incineração (inferior a 100000 ton RU/ano, entre 100 000 e 250 000 e acima de 250 000 ton RU/ano) e localização geográfica europeia i) Norte da Europa (DK, FI, SE), ii) Europa Central (AT, BE, CH, CZ, DE, parte nordeste de FR, GB, HU, LU, NL), iii) Sudoeste europeu (ES, resto

de FR, IT, PT). O referido estudo envolveu 314 unidades de incineração da União Europeia. A eficiência R1 é, em média, 0,69 (entre um mínimo de 0,21 e um máximo de 1,37). O fator R1=0,60, que é o critério estabelecido para as instalações existentes para obter o estatuto de unidade de recuperação energia, é alcançada por 206 unidades de recuperação (65,6%) do total de 314 investigadas.

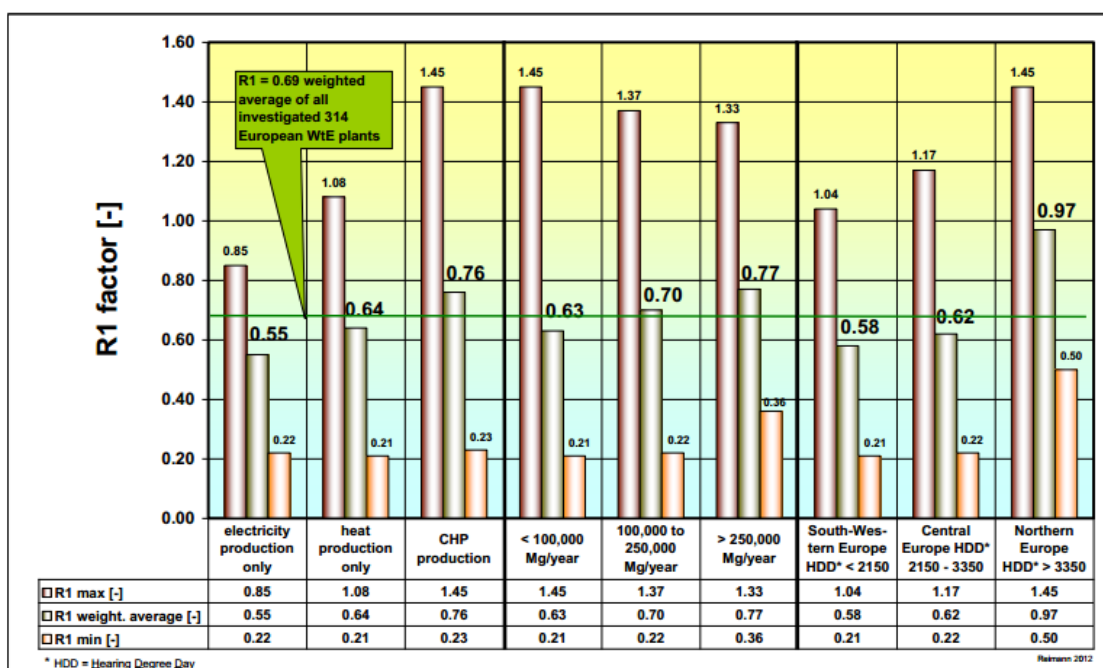


Figura 1.7 - Eficiência R1 calculada para diferentes unidades de incineração de resíduos [Fonte: Reimann, 2012].

Comparando os resultados do relatório III para o período de 2007-2010 abrangendo 314 unidades de incineração da UE com as 231 unidades de incineração para o período de 2004-2007 (relatório II), verifica-se que foram alcançados os melhores resultados para o fator R1 de eficiência em comparação com o Relatório II apesar de mais unidades de incineração da Europa de Sul, Ocidental e Central terem uma eficiência R1 menor, sendo que têm menos oportunidade de exportar o calor (ver Figura 1.8).

As unidades de incineração que apenas produzam eletricidade, num total de 83, têm uma eficiência R1 média não ponderada pela capacidade de 0,55, verificando-se que 37,3% dessas incineradoras atingem R1≥0,60.

Embora as incineradoras que produzam apenas calor, num total de 47, tenham um maior valor médio não ponderado de R1=0,64, apenas 68,1% dessas incineradoras atingem

$R1 \geq 0,60$. Neste caso, a importação de energia elétrica para tratar os resíduos tem uma influência negativa.

As unidades de incineração com produção de eletricidade e calor (CHP), num total de 184, atingem o mais alto valor médio não ponderado de $R1=0,76$ de modo que 77,2% das unidades de incineração atingem $R1 \geq 0,60$.

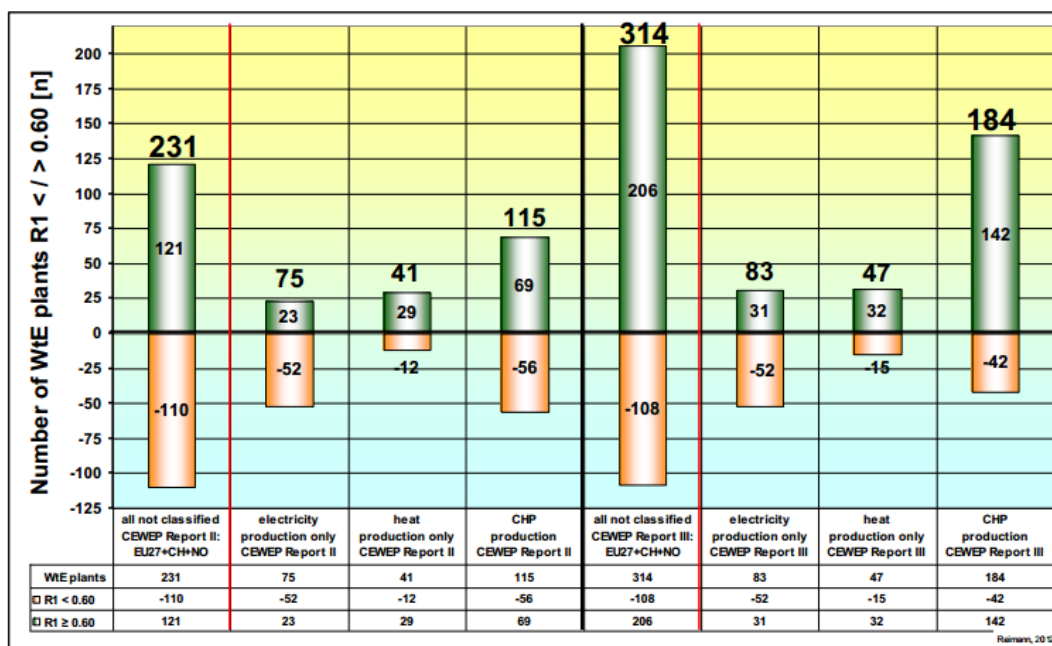


Figura 1.8 - Comparação da eficiência $R1$ de unidades de incineração em função do tipo de recuperação de energia para os períodos de 2004-2007 e 2007-2010 [Fonte: Reimann, 2012].

Em relação à dimensão das incineradoras, as pequenas incineradoras (<100000 ton RU / ano, num total de 118) têm uma eficiência média não ponderada de 0,63, em que 50% das incineradoras atingem $R1 \geq 0,60$. As incineradoras médias (100.000 ton RU a 250 000 ton / ano, num total de 124) têm uma eficiência média não ponderada de 0,70, em que 68,5% das incineradoras atingem $R1 \geq 0,60$. As incineradoras grandes (> 250 000 ton / ano, num total de 72) têm uma eficiência média não ponderada de 0,77, em que 86,1% das incineradoras atingem $R1 \geq 0,60$.

Em relação à localização geográfica, as incineradoras do sudoeste europeu, num total de 55, têm uma eficiência média não ponderada de 0,58, em que 49,1% das incineradoras atingem $R1 \geq 0,60$. As incineradoras da Europa central, num total de 188, têm uma eficiência média não ponderada de 0,62, em que 58,5% das incineradoras atingem $R1 \geq 0,60$. As incineradoras da Europa do norte, num total de 71, têm uma eficiência média não ponderada de 0,97, em que 97,2% das incineradoras atingem $R1 \geq 0,60$.

1.7 OBJETIVOS DA TESE

O objetivo deste trabalho é o estudo da eficiência energética de uma instalação de incineração de resíduos urbanos no âmbito das operações de valorização ou eliminação de resíduos, tendo em conta o critério dado pela fórmula de eficiência R1.

No âmbito do trabalho a desenvolver, serão desenvolvidos um conjunto de modelos tendo em vista representar o balanço mássico e energético do processo de incineração de resíduos e ainda o processo de recuperação de energia. O desenvolvimento dos referidos modelos requer informação de base que pode ser obtida a partir de dados da literatura e dados de operação típicos de uma unidade de incineração de resíduos urbanos. O cálculo do balanço mássico dos reagentes e dos produtos de combustão e balanço energético da instalação de incineração deverá permitir determinar as quantidades de produtos gasosos e sólidos que são gerados diariamente bem como estimar a quantidade de energia disponível.

O contributo esperado é um conjunto de operações do sistema de recuperação de calor, ao nível das especificações de caudal, pressão, temperatura do vapor associado a operação de uma turbina com extração. A utilização de uma ferramenta informática de modelação e simulação do funcionamento de uma unidade de incineração, com variáveis de operação pré-definidos, deverá permitir estimar o papel das diferentes variáveis intervenientes e avaliar a eficiência da operação de incineração de acordo com a fórmula R1 referida.

A aplicação da fórmula R1 de eficiência de conversão energética é um ponto sensível destas instalações, pois apesar de tudo foram concebidas para incinerar resíduos com o mínimo de impactos ambientais.

2 METODOLOGIA DO TRABALHO

A incineração de resíduos pode ser ambientalmente correta e aliada da proteção do meio ambiente, desde que estas instalações sejam operadas por equipas qualificadas e treinadas; sejam dotadas de equipamento eficazes quanto ao controle de poluição, bem como, de técnicas adequadas de disposição final dos resíduos gerados; e sejam monitorizadas e acompanhadas pela comunidade e pelos agentes ambientais, públicos e privados. Os processos mais avançados de incineração de resíduos fazem da recuperação de energia um aspeto essencial da respetiva exploração.

Neste âmbito, a análise do processo de incineração não difere muito do processo de conversão de energia a partir de combustíveis fósseis, podendo assim tirar partido das ferramentas de balanço mássico e energético, das ferramentas de simulação dos ciclos termodinâmicos, que serão detalhados nas próximas secções.

2.1 BALANÇO MÁSSICO

O balanço mássico a um incinerador ou sistema de combustão consiste fundamentalmente em calcular, em estado estacionário e para um dado conjunto de condições operatórias nomeadamente de composição elementar do material a incinerar, de excesso de ar – a quantidade e composição dos gases de combustão, a composição e quantidade de resíduos incinerados produzidos.

A metodologia usada no balanço mássico e energético segue estritamente a formulação desenvolvida (Matos, M.A.A. 2006).

A base de cálculo do balanço mássico, é assente na unidade de massa de material sólido seco a incinerar. A metodologia aplica a Primeira Lei da Termodinâmica e prevê a distribuição dos produtos maiores (por exemplo N_2 , CO_2 , O_2 , H_2O e cinzas).

O balanço mássico apresenta bastante interesse sob o ponto de vista operacional, permitindo estimar de forma rigorosa as necessidades de ar de combustão, prever a composição dos produtos de combustão ou para analisar o desempenho de um dado equipamento em relação as condições operacionais.

2.1.1 REAGENTES

Os reagentes são constituídos pelo resíduo sólido a incinerar e pelo ar de combustão.

2.1.1.1 RESÍDUOS A INCINERAR

A composição do resíduo a incinerar diz respeito ao teor ponderal dos vários elementos químicos que compõem a fração orgânica. A análise elementar do resíduo implica o conhecimento do teor em carbono (C), hidrogénio (H), oxigénio (O), nitrogénio (N), enxofre (S) e cinza (Z). A análise da composição do resíduo é importante do ponto de vista energético, mas também para conhecer a composição das emissões durante a incineração. Na Tabela 2.1 (Tchobanoglous *et.al.*, 1996) encontra-se uma composição média de alguns componentes dos RU.

Tabela 2.1 - Composição dos resíduos orgânicos [Fonte: adaptado de Tchobanoglous *et.al.*, 1996].

Percentagem em massa (% - Base seca)						
Componentes	Carbono	Hidrogénio	Oxigénio	Azoto	Enxofre	Cinzas
Res. Comida	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel/ papelão	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Plásticos	60,0	7,2	22,8			10,0
Têxteis	55,0	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
Borracha	78,0	10,0		2,0		10,0
Couro	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
Res. Jardim	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5
Madeira	49,5	6,0	42,7	00,2	0,1	1,5

Ainda segundo Tchobanoglous *et.al.*, (1996), na Tabela 2.2, encontra-se a composição da parte inorgânica que não irá contribuir para o Poder Calorífico do RSU Tabela 2.3.

Tabela 2.2 - Composição dos resíduos inorgânicos [Fonte: adaptado de Tchobanoglous *et.al.*, 1996].

Percentagem em massa (% - Base seca) - Inorgânicos						
Componentes	Carbono	Hidrogénio	Oxigénio	Azoto	Enxofre	Cinzas
Vidros	0,5	0,1	0,4	<0,1		98,9
Metais	4,5	0,6	4,3	<0,1		90,5
Cinza, etc.	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0

Tabela 2.3 - Poder calorífico dos constituintes do resíduo [Fonte: adaptado de Tchobanoglous *et.al.*, 1996].

Componentes	W_{iH}	W_{Wi}	ρ_i	PCI_i	W_{Ci}	W_{Hi}	W_{O_i}	W_{N_i}	W_{S_i}	W_{Z_i}	W_{B_i}
	(kg i btq/ kg H btq)	(kg H ₂ O/ kg i btq)	(kg i btq/ m ³)	(MJ/ kg i bs)	(kg j/kg i bs)						(kg i bio/ kg i bssc)
Resíduos alimentares	0,150	0,70	288	4,65	0,480	0,064	0,376	0,026	0,004	0,050	1,00
Papel	0,400	0,06	82	16,74	0,435	0,060	0,440	0,003	0,002	0,060	0,80
Cartão	0,040	0,05	50	16,28	0,440	0,059	0,446	0,003	0,002	0,050	0,80
Plásticos	0,030	0,02	64	32,56	0,600	0,072	0,228	0,000	0,000	0,100	0,00
Texteis	0,020	0,10	64	17,54	0,546	0,066	0,312	0,046	0,005	0,025	0,10
Borracha	0,005	0,02	128	23,26	0,780	0,100	0,000	0,020	0,000	0,100	0,00
Couro	0,005	0,10	160	17,45	0,600	0,080	0,116	0,100	0,004	0,100	0,00
Resíduos jardinagem	0,120	0,60	104	5,52	0,478	0,060	0,380	0,034	0,003	0,045	1,00
Madeira	0,020	0,20	240	18,61	0,495	0,060	0,427	0,002	0,001	0,015	0,25
Vidro	0,080	0,02	194	0,14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,00
Embalagens estanhadas	0,060	0,02	88	0,71	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,00
Metais n/ ferrosos	0,010	0,02	160	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,00
Metais ferrosos	0,020	0,02	320	0,71	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,00
Poeira, cinza, areia, etc.	0,040	0,08	481	6,98	0,263	0,030	0,020	0,005	0,002	0,680	0,00

Os altos teores de humidade dos resíduos sólidos urbanos são basicamente provenientes dos materiais orgânicos (resíduos alimentares e de jardim). Os componentes inorgânicos, tais como, metais e vidros, geralmente têm um teor de humidade abaixo de 10%. O teor de humidade tem influência direta sobre a velocidade de decomposição da matéria orgânica no processo de compostagem, na produção de biogás, no poder calorífico, no peso específico aparente do RSU e na produção de lixiviado, sendo assim, seu conhecimento é de extrema importância para projetos de incineração controlada. A (Eq.2.1), permite calcular o rácio de humidade do resíduo.

$$W_{WR} = \frac{W_{WH}}{1 - W_{WH}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

em que o teor de humidade da mistura H a incinerar em base tal e qual e calcula-se a partir do teor de humidade de cada componente (papel, plástico, etc) dado na Tabela 2.1, sendo expressa por

$$w_{WH} = \frac{\sum w_{iH} w_{Wi}}{\sum w_{iH}} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

em que a abundância de cada componente em base seca se calcula a partir de

$$w_{iR} = \frac{w_{iH} (1 - w_{Wi})}{\sum w_{iH} (1 - w_{Wi})} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

A composição elementar ponderal da mistura em base seca calcula-se com base na composição elementar dos componentes da mistura (ver Tabela 2.1) através de

$$w_{jR} = \frac{\sum w_{iR} w_{ji}}{\sum w_{iR}} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

O poder calorífico inferior dos resíduos (PCI) é uma importante propriedade dos resíduos para efeitos de incineração. Expresso em MJ/kg em base seca, o PCI depende exclusivamente da composição elementar e do teor de cinzas. A presença de humidade nos resíduos reduz a quantidade de energia que fica disponível durante a incineração.

$$\text{PCI}_R = \frac{\sum w_{iR} \text{PCI}_i}{\sum w_{iR}} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

2.1.1.2 AR DE COMBUSTÃO

A mistura comburenta a utilizar é geralmente ar atmosférico e deverá também encontrar-se adequadamente caracterizada em termos de composição molar seca (y_{iA}) e da respetiva razão mássica de vapor (W_{VA}).

Na incineração de resíduos a mistura comburenta é geralmente o ar atmosférico (A), que se caracteriza pela sua composição em termos de fração molar da mistura seca ($y_{O_2,A}=0.21$, $y_{N_2,A}=0.78$; $y_{Ar,A}=0.01$) e ainda por apresentar uma dada temperatura (T_A) e humidade relativa (HR). Pela forma como é desenvolvida a equação de balanço mássico, é conveniente referir a composição do ar (A) por kmol de oxigénio, ou seja:

$$Y_{N_2,A} = \left(\frac{1 - y_{O_2,A}}{y_{O_2,A}} \right) = 3.76 \text{ [kmol de } N_2/\text{kmol de } O_2]$$

$$Y_{H_2O,A} = W_{VA} \left(\frac{1}{y_{O_2,A}} \right) \left(\frac{M_A}{18} \right) = 7.66 W_{VA} \text{ [kmol de } H_2O/\text{kmol de } O_2]$$

Em que a massa molar do ar atmosférico seco, vem:

$$M_A = \sum y_{iA} M_i = 28.96 \quad (\text{Eq. 2.6})$$

$W_{VA} = f(T, HR)$ determina-se no diagrama psicrométrico; em cálculos de incineração muitas vezes despreza-se W_{VA} , isto é considera-se o ar de combustão como seco.

2.1.2 NECESSIDADES DE AR DE COMBUSTÃO

Por razões que tem a ver com a velocidade de transferência de massa ao nível das partículas sólidas, é muito difícil evitar a ocorrência de não-queimados gasosos e/ou sólidos acompanhando os gases de escape ou as cinzas. Uma forma de minorar este problema é reduzir as dimensões do material e expô-lo à corrente gasosa (aumentando a agitação ou turbulência) ou aumentando a relação comburente/combustível λ (razão de equivalência) para além da necessidade estequiométrica.

$$\lambda = \frac{W_a}{W_s} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

em que W_s é a razão estequiométrica e W_a a razão mássica de oxigénio em relação à mistura de resíduos em incineração efetivamente usada.

A necessidade estequiométrica do oxigénio para um dado material combustível calcula-se através da expressão:

$$W_s = 32 \left[\sum \frac{Y_{s,j} W_{jR}}{M_j} - \frac{W_{OR}}{32} \right] \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Em alternativa à razão de equivalência pode exprimir-se o excesso de ar (z), quando se usa o ar como fonte de oxigénio, denomina-se excesso de comburente (também denominado como excesso de ar), definido em percentagem, através da relação:

Com razão mássica atual de oxigénio de combustão:

$$W_a = W_s \left(1 + \frac{z(\%)}{100} \right) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Em que o excesso de ar é dado pela formula:

$$z = 100 \left(\frac{W_a}{W_s} - 1 \right) \quad (\text{Eq. 2.10})$$

No caso de ar atmosférico e nas condições de excesso de oxigénio definidas, a razão atual de ar de combustão é dada por:

$$W_{AR} = W_a \left(\frac{M_A}{y_{O_2A} M_{O_2}} \right) \quad (\text{Eq. 2.11})$$

Para o caso do ar atmosférico seco: $M_A=28.96$, ou seja $W_{AR}= 4.31W_a$

2.1.3 PRODUTOS DE COMBUSTÃO

Os produtos de incineração incluem por um lado os gases, que constituem o efluente gasoso que será enviado para a atmosfera, e por outro os resíduos sólidos de combustão, destinados a ser enviados para aterro.

2.1.3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS DE INCINERAÇÃO

O resíduo incinerado é composto por uma parte inerte à combustão (cinzas) e, eventualmente, por uma parte orgânica, essencialmente composta por carbono; estes resíduos incinerados arrastam consigo vários micropoluentes orgânicos adsorvidos (PAH's) e poluentes inorgânicos (metais). O resíduo incinerado pode sair do sistema principalmente como escória (E) através das grades para o cinzeiro, ou na forma de resíduos volantes (V) a acompanhar o efluente gasoso. A composição destes dois tipos de resíduos incinerados é usualmente diferente ao nível pelo que é necessário conhecer a sua composição em termos do teor de cinza para se determinar o balanço mássico:

Admite-se para efeitos do balanço mássico que o resíduo incinerado é constituído apenas por cinzas e carbono, ou seja:

$$w_{CV} = 1 - w_{ZV} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

$$w_{CE} = 1 - w_{ZE} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

A abundância dos resíduos incinerados em relação ao resíduo a tratar no âmbito do processo de incineração, pode exprimir-se em termos das razões ponderais W_{VR} e W_{ER} respeitantes aos resíduos volante e escória, respetivamente.

Tipicamente W_{VR} corresponde a cerca de 7.5% do total ponderal de resíduos sólidos resultantes da incineração (escória+volantes). A presença de um despoeirador eficiente torna-se normalmente necessário. A presença de um lavador húmido ajuda à remoção de partículas.

2.1.3.2 GASES DE COMBUSTÃO

Os gases de combustão são essencialmente CO₂, H₂O, O₂ e N₂ mas podem ainda possuir HC, H₂, CO (estes motivados essencialmente por combustão incompleta), NO_x, SO, HCl, HF e certos micropoluentes orgânicos (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, dioxinas, furanos, etc.). Para o balanço mássico global, estes últimos componentes apresentam pouco interesse, a despeito da sua importância poluente. Para efeito de balanço mássico, adotou-se as seguintes referências para cada produto. 1=CO₂, 2=H₂O, 3=CO, 4=H₂, 5=O₂, 6=N₂, 7=SO₂. Outros componentes gasosos podem ser negligenciados para o efeito de balanço mássico.

A base de cálculo do balanço mássico é o elemento químico [kmol elemento ou composto j kg⁻¹ mistura de resíduos R a incinerar em base seca] sendo desenvolvida para os elementos CHONS e para a cinza.

Assim, para o carbono:

$$\frac{w_{CR}}{12} = n_{1R} + n_{3R} + [w_{CV}W_{VR} + w_{CE} + W_{ER}] \quad (\text{Eq. 2.14})$$

para o hidrogénio:

$$\frac{w_{HR}}{2} + \frac{W_{WR}}{18} + \frac{W_a}{32} W_{VA} (7.66) = n_{2R} + n_{4R} \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Para o oxigénio:

$$\frac{w_{OR}}{32} + 0.5 \frac{W_{WR}}{18} + \left(\frac{W_a}{32} \right) [1 + 0.5W_{VA} (7.66)] = n_{1R} + \frac{n_{2R}}{2} + \frac{n_{3R}}{2} + n_{5R} + n_{7R} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

Para o azoto:

$$\frac{w_{NR}}{28} + \left(\frac{W_a}{32} \right) (3.76) = n_{6R} \quad (\text{Eq. 2.17})$$

Para o enxofre:

$$\frac{w_S}{32} = n_{7R} \quad (\text{Eq. 2.18})$$

Para a parte inorgânica, para as cinzas em base seca é dada por:

$$w_{ZR} = w_{ZV}W_{VR} + w_{ZE}W_{ER} \quad (\text{Eq. 2.19})$$

Assim a expressão estequiométrica da reação de combustão com ar atmosférico é dada por:

$$\left(\frac{w_{CR}}{12}, \frac{w_{HR}}{2}, \frac{w_{OR}}{32}, \frac{w_{NR}}{28}, \frac{w_{SR}}{32}, w_{ZR}, \frac{w_{WR}}{18} \right) + \frac{W_a}{32} (4.76 + 7.66W_{VA}) =$$
$$n_{1R} + n_{2R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + (w_{ZV}W_{VR} + w_{ZE}W_{ER}) +$$
$$\frac{w_{CV}W_{VR} + w_{CE}W_{ER}}{12} \quad (\text{Eq. 2.20})$$

2.2 BALANÇO ENERGÉTICO

O balanço energético de uma instalação de incineração que se apresenta faz a aplicação do princípio de conservação de energia numa fornalha, evoluindo a pressão constante, considerando negligenciáveis as energia cinética e potencial em torno da fornalha. O balanço energético consiste fundamentalmente no cálculo, em estado estacionário, da grandeza das várias formas energéticas presentes ligadas aos intervenientes materiais do circuito aberto de entrada e saída, pelo que necessita do estabelecimento prévio do balanço mássico e inclui ainda a energia recuperada para utilidades e a energia perdida (dissipada).

Durante o processo de recuperação de energia, é usado um fluido em circuito fechado (água) que é sujeito a um conjunto de alterações de propriedades (temperatura, pressão, volume), de forma a ceder ou receber fluxos de trabalho e/ou calor através das fronteiras do sistema. Quando um fluido sofre alterações consecutivas de suas propriedades, de modo a retornar a condição inicial, diz-se que ocorreu um ciclo termodinâmico.

A entalpia é a função termodinâmica de estado mais adequada para exprimir o princípio da conservação de energia de um sistema aberto característico do processo de combustão (a pressão constante). A entalpia não é uma propriedade absoluta, sendo geralmente referida a uma dada condição de referência, que no presente exercício é a temperatura, $T_0 = 25^\circ\text{C}$, e a água no estado de vapor.

O balanço energético da incineração consiste no cálculo, em estado estacionário, da grandeza das várias formas energéticas presentes na Figura 2.1:

- calor sensível inerente a todos os intervenientes materiais;

- calor latente de vaporização (da humidade, por exemplo);
- calor da reação de combustão dos vários componentes combustíveis;
- calor aproveitado (ou energia útil);
- calor dissipado por convecção e radiação através das paredes exteriores do incinerador.

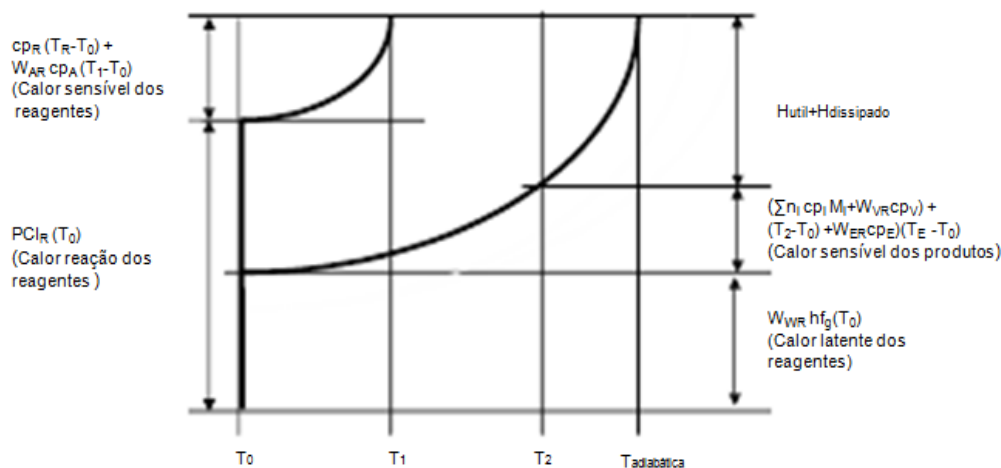


Figura 2.1 - Componentes entálpicos da combustão de um resíduo [Fonte: Matos. M.A.A., 2011].

O balanço energético para o incinerador (ver Figura 2.2) pode ser traduzido na seguinte equação:

$$\Delta H_{reagentes} = \Delta H_{produtos} + \Delta H_{util} + \Delta H_{dissipado} \quad (\text{Eq. 2.21})$$

A energia útil ΔH_{util} é a quantidade de calor dos produtos gasosos de combustão que é transferida através dos sistemas de permutadores de calor para a produção de utilidades (calor de processo, energia mecânica, etc.)

$\Delta H_{dissipado}$ é a energia perdida pelo sistema sob a forma de calor dissipado à superfície externa da instalação, por convecção junto a parede, por radiação e por condução. O fluxo de calor dissipado depende do isolamento térmico, do tipo de incinerador, da conservação e do estado da incineradora. Normalmente o valor da dissipação é estimado em 5 %.

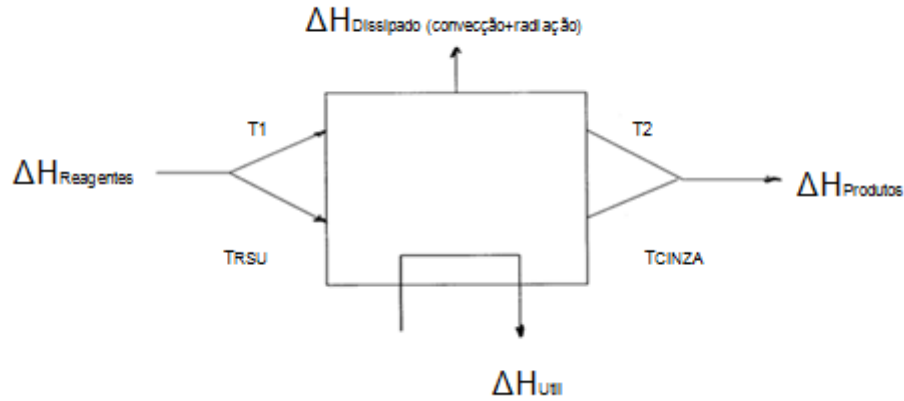


Figura 2.2 - Balanço energético geral ao incinerador [Fonte: Matos M.A.A., 2006].

Ainda em relação à Figura 2.1, a temperatura de combustão adiabática de um dado resíduo é aquela em que toda a energia desenvolvida na reação vai a acompanhar os produtos, ou seja, em que $\Delta H_{util}=0$ e $\Delta H_{dissipado}=0$.

2.2.1 ENERGIA DOS REAGENTES

Numa incineração de resíduos, os reagentes são os resíduos (combustível) e o ar de combustão (comburente). A forma mais conveniente de exprimir a energia dos reagentes num processo aberto a pressão constante é a função de estado termodinâmica entalpia. A entalpia dos reagentes, expressa como $\Delta H_{reagentes}$, no presente caso inclui calor sensível, calor latente e calor de reação química, como mostra a equação seguinte

$$\Delta H_{Reagentes} = \Delta H_{sR} + \Delta H_{LR} + \Delta H_{rR} \quad (\text{Eq. 2.22})$$

Onde o calor sensível dos reagentes é a energia transportada pelo resíduo sólido e o ar de combustão, tendo uma temperatura T_R e T_A , respetivamente,

$$\Delta H_{sR} = [cp_R + W_{WR}cp_W](T_R - T_0) + W_{AR}[cp_A + W_{VA}cp_{H_2O(g)}](T_A - T_0) \quad (\text{Eq. 2.23})$$

O calor latente dos reagentes tem a ver com a energia necessária para evaporar a humidade que os resíduos contêm

$$\Delta H_{LR} = -W_{WR}h_{wv,T_0} \quad (\text{Eq. 2.24})$$

E o calor de reação (calor de combustão) representa o poder calorífico inferior (PCI) do resíduo a incinerar dado à temperatura de referência:

$$\Delta H_{\text{IR}} = \text{PCI}_{\text{R}, T_0} \quad (\text{Eq. 2.25})$$

O poder calorífico do resíduo corresponde à energia calorífica possível extrair por unidade de massa de resíduo, quando queimado ao ar. O poder calorífico superior, PCS, representa a energia calorífica máxima possível extrair por unidade de massa de resíduo. O poder calorífico inferior, PCI, representa a energia disponível por unidade de massa de resíduo, e obtém-se subtraindo do poder calorífico superior, o calor latente do vapor de água resultante da combustão do hidrogénio orgânico do combustível dada por:

$$\text{PCI}_{\text{R}} = \text{PCS}_{\text{R}} - w_{\text{HR}}(21,98 \times 10^6) \quad (\text{Eq. 2.26})$$

2.2.2 ENERGIA DOS PRODUTOS

A energia dos produtos diz respeito à energia contida nos gases resultantes da combustão dos resíduos e à energia contida nas cinzas

$$\Delta H_{\text{Produtos}} = \Delta H_{\text{SP}} + \Delta H_{\text{LP}} + \Delta H_{\text{IP}} \quad (\text{Eq. 2.27})$$

O ΔH_{SP} é o calor sensível dos produtos ou seja o calor sensível dos gases de combustão e do resíduo incinerado.

$$\Delta H_{\text{SP}} = \left\{ \sum n_{\text{IR}} M_i \text{cp}_i + w_{\text{ZV}} W_{\text{VR}} \text{cp}_z + w_{\text{CV}} W_{\text{VR}} \text{cp}_c \right\} (T_2 - T_0) + [w_{\text{ZE}} W_{\text{ER}} \text{cp}_z + w_{\text{CE}} W_{\text{ER}} \text{cp}_c] (T_E - T_0) \quad (\text{Eq. 2.28})$$

O calor latente dos produtos ΔH_{LP} é nulo pois deve ser evitada a condensação dentro da instalação de incineração, para evitar a corrosão, evitando a deterioração dos tubagens e dos refractários.

O calor de reação dos produtos é o calor dos produtos inqueimados da incineração, referindo-se ao PCI dos gases ainda combustíveis e ainda ao $\text{PCI}_{\text{C}, T_0}$ do carbono contido nas cinzas

$$\Delta H_{\text{IP}} = \sum n_{\text{IR}} M_i \text{PCI}_i + (w_{\text{CV}} W_{\text{VR}} + w_{\text{CE}} W_{\text{ER}}) \text{PCI}_{\text{C}, T_0} \quad (\text{Eq. 2.29})$$

com $\text{PCI}_{\text{C}@298\text{K}} = 32,79 \text{ MJ/kg carbono}$.

2.3 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

A operação de um sistema de incineração respeita às condições de exploração do equipamento, nomeadamente de temperatura, tempo de residência de gases e de sólidos e o excesso de ar. A prática recomenda o uso de excesso de ar de forma a garantir uma combustão adequada dos resíduos. De acordo com o DL nº 85/ 2005, o artigo 21 diz-nos que todas as instalações de incineração e de co-incineração de resíduos devem possuir e ter em funcionamento um sistema automático que impeça que a alimentação de resíduos seja feita nas seguintes condições: 1) no estágio do arranque antes que a temperatura de 850 °C ou 1100 °C conforme descrito nos artigos 19 e 20, ou enquanto não se atingir a temperatura especificada pela autoridade competente; 2) sempre que a temperatura não seja mantida a 850 °C ou 1100 °C ou a temperatura especificada pela autoridade competente; 3) sempre que as medições contínuas indiquem que foram excedidos os valores limites de emissão que resultem de perturbações ou avarias dos dispositivos de tratamento.

As instalações de incineração devem ser concebidas, equipadas, construídas e exploradas de forma a prevenir as emissões para a atmosfera que possam resultar em poluição significativa do ar ao nível do solo, sendo que estas não podem dar origem a violação dos valores limites de qualidade de ar.

A emissão de poluentes para a atmosfera deve ser feita de uma forma controlada usando um chaminé a qual tem a altura calculada de forma a salvaguardar a saúde humana e proteção ambiental de acordo com a legislação aplicável.

Os locais para as instalações e as áreas que estão associadas ao armazenamento de resíduos devem ser concebidos e explorados para que se previna a libertação não autorizada e acidental de substâncias poluentes para o solo, águas superficiais e subterrâneas de acordo com as leis aplicáveis. Deve ainda ter-se em conta a capacidade destes locais para armazenamento das águas da chuva contaminadas que ali escorram ou para as que resultem de derrames ou de operações de combate a incêndios e ainda que estas águas possam ser analisadas e tratadas antes da sua descarga ou envio para o destino final.

O artigo 24 do mesmo DL nº 85/ 2005 de 28 de Abril impõe que a exploração das instalações de incineração deve realizar-se para que a o teor de Carbono Orgânico Total (COT) das escórias e das cinzas volantes seja inferior a 3% ou que a sua perda por combustão se encontre abaixo dos 5% de peso do material. Para tal é necessário a aplicação de técnicas adequadas ao tratamento prévio dos resíduos.

Relativamente aos resíduos hospitalares contendo infecciosos, estes devem ser colocados diretamente no forno sem terem sido misturados com outras categorias de resíduos e sem manipulação direta.

2.4 TECNOLOGIAS DE INCINERAÇÃO

A incineração dos resíduos é efetuada nos incineradores. Os incineradores podem ser classificados quanto ao processo de alimentação em: (a) incineradores descontínuos ou por partidas (normalmente sem recuperação de energia, ainda usados em crematórios e em pequenas indústrias) (b) e incineradores contínuos (geralmente com recuperação de calor).

As tecnologias de incineração contínua incluem vários tipos cuja aplicação está relacionada com a natureza dos resíduos (perigosa ou não perigosa), o estado físico e a dimensão dos resíduos a incinerar, o teor de humidade e de cinzas, o poder calorífico, etc. As tecnologias de incineração em contínuo incluem os incineradores de grelhas móveis, os leitos fluidizados, o trommel rotativo, os “afterburners”, os incineradores por plasma. A incineração de resíduos urbanos é geralmente efetuada em incineradores de grelhas.

2.4.1 INCINERADORES DE GRELHAS MÓVEIS;

As grelhas foram o primeiro sistema de combustão usado para combustíveis sólidos. Atualmente, são principalmente usadas na combustão de biomassa, resíduos urbanos, e em algumas pequenas fornalhas de carvão, podendo utilizarem combustíveis sólidos de um amplo conjunto de dimensões. A Figura 2.3 apresenta um sistema de combustão em grelha sendo constituído por: um sistema de alimentação do combustível, uma entrada de ar primário, um conjunto de grelhas, uma entrada de ar secundário e um sistema de descarga de cinzas. No sistema de grelhas que incorpora cada incinerador, o material é normalmente despejado sobre uma grade dotada de mobilidade, que com velocidade adequada, vai movimentando os resíduos. Ao longo da trajetória sobre a grelha o resíduo tem oportunidade de secar (até 150°C), de volatilizar (até 450°) e finalmente gasificar o resíduo carbonáceo; para o efeito recebe ar primário, através das grelhas, entre 60 a 100% do valor estequiométrico) (Matos, M.A.A., 2006). Consegue-se uma boa distribuição do ar para dentro do forno de incineração, de acordo com os requisitos de combustão (IPPC, BREF, 2006). A agitação do material em combustão pela ação das

grades e do ar primário, é fundamental para aumentar a velocidade de transferência de calor e eliminar volumes vazios existentes na massa em combustão. A alimentação dos resíduos é realizada por alimentadores mecânicos automáticos. As grelhas encontram-se na parte inferior da câmara de combustão e possuem duas funções: suporte e transporte longitudinal dos resíduos sólidos em combustão e permitir a distribuição do ar primário (entrada de ar pela parte inferior da grelha). As grelhas são classificadas em grelhas estacionárias ou móveis, estas últimas podem ser recíprocas (com movimento descendente ou ascendente das barras ou alternativas), de balanço, vibratórias ou oscilante, móvel ou de tambor. Yin *et al.*, (2008) apresenta as principais características de cada tipo. O ar de combustão, para sistemas tipo grelha, incluem duas componentes: ar através da grelha ou ar primário, ar acima da grelha ou ar secundário. O ar primário tem como função principal garantir uma distribuição adequada do ar ao longo do leito de combustão. O ar secundário promove a mistura com os gases provenientes do leito de combustão, realizando “afterburning” dos gases resultantes da combustão/gasificação dos resíduos localizada na câmara acima das grelhas e onde se observam as mais elevadas temperaturas da incineração. A grelha pode ser refrigerada com ar ou água. Quando é refrigerada com água exige pouco ar para arrefecer (o ar primário limita-se à exigência necessária para a combustão) e é flexível com o uso de um avançado sistema de ar secundário.

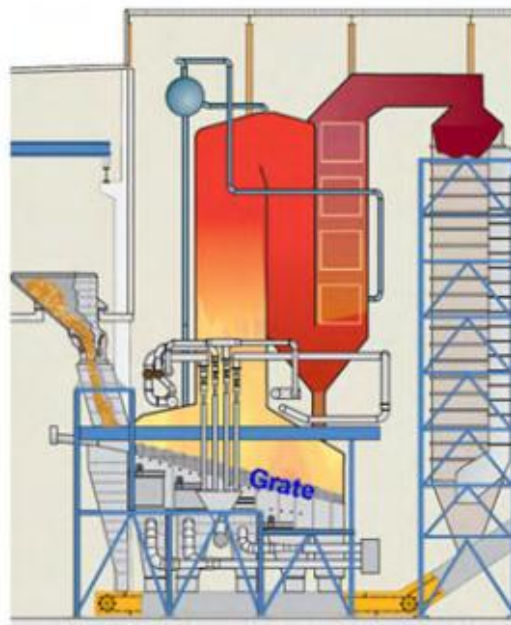


Figura 2.3 - Estrutura de um sistema de grelhas (grelha recíproca para a queima de RSU) [Fonte: Yin *et al.*, 2008].

2.4.2 FORNO ROTATIVO

O sistema de forno rotativo é um sistema muito versátil utilizado para queimar resíduos sólidos numa variedade de formas: em bruto, reservatórios, granuladas, lamas, pasta. A ação de rotação serve para promover a agitação e o contacto entre o ar e o resíduo. Este sistema tem especial interesse para a incineração de resíduos perigosos, misturas de resíduos e para termoplásticos que amolecem durante o aquecimento e podem colmatar as grades. O sistema de forno rotativo (ver Figura 2.4) é constituído por um alimentador, um injetor de ar, o próprio forno (cilindro em aço refractário suportado em dois ou mais (de preferência dois) apoios, uma câmara de pós combustão (afterburner), um sistema de coletor de cinzas e um sistema de tratamento de gases. No topo do forno rotativo existe sempre um injetor de combustível auxiliar, a base de gás ou fuel, que é usado para iniciar o arranque da unidade de incineração, de modo a permitir atingir temperatura necessária para o processo. Estes são carregados na extremidade do forno no mesmo ponto em que podem ser utilizados queimadores auxiliares para fornecerem a energia necessária ao processo. O processo de combustão num forno rotativo é em larga escala realizado em condições de deficiência de oxigénio e de mistura relativamente fraca no espaço acima do leito de combustão, pois não existe introdução de ar ao longo do comprimento do forno. A carcaça encontra-se numa posição quase horizontal, com um ângulo de 2-4°, e rola segundo o seu eixo com uma velocidade de 0,5-2 rotações por minuto.

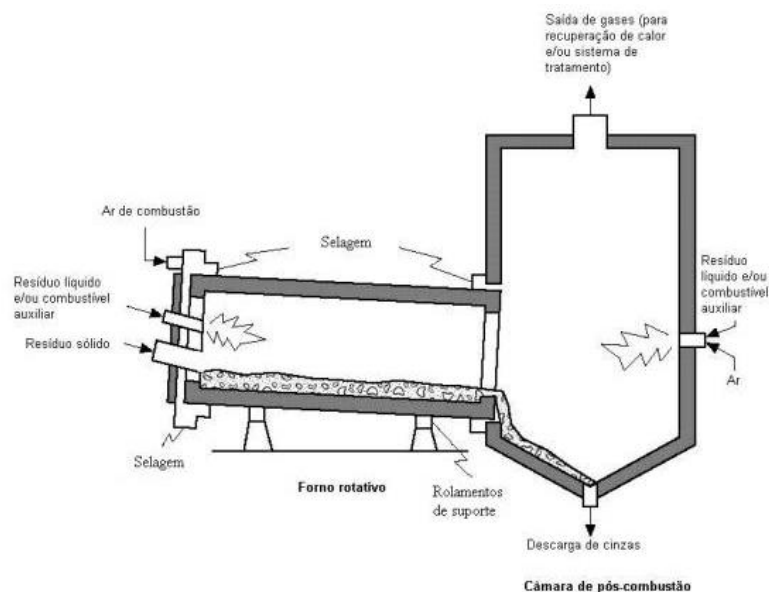


Figura 2.4 - Esquema de um sistema de combustão em forno rotativo [Fonte: Formosinho S., *et al.*, 2000].

A câmara de pós-combustão situa-se no final do forno rotativo, como mostra a Figura 2.4, e recebe os gases e cinzas deles provenientes. Na câmara de pós-combustão que opera a temperaturas de 1100 - 1400°C com excesso de ar de 100 a 200% completa-se a queima dos gases, iniciada no forno rotativo (Formosinho S., *et al.*, 2000).

A temperatura elevada, o excesso de ar comburente e o tempo de residência de um a 3 segundos permitem concluir com uma eficiência elevada a destruição dos compostos orgânicos iniciados no forno rotativo.

2.4.3 INCINERADOR DE LEITO FLUIDIZADO;

Um leito fluidizado é uma técnica que permite queimar combustíveis ditos de menor qualidade (por possuírem elevado teor de humidade, conteúdo elevado em voláteis e substâncias poluentes) com elevada eficiência e baixo nível de emissões poluentes, mas que requer um certo grau de pré-tratamento no que diz respeito a tamanho das partículas (Scala, (2004), IPPC, BREF, (2006)). São conhecidos diversos tipos de fluidização que são função da velocidade do gás: de leito estacionário ou borbulhante, de leito turbulento e por fim leito circulante ou de fluidização rápida.

- combustão em leito fluidizado borbulhante CLFB:

- combustão em leito fluidizado circulante CFBC.

Os incineradores de leito fluidizado são amplamente aplicados para a incineração de resíduos de tamanho reduzido como CDR, lamas de ETAR. Tem sido usada durante décadas, principalmente para a combustão de combustíveis homogêneos. Entre eles estão o carvão, lenhite cru, lamas de ETAR e biomassa (por exemplo, madeira). No leito fluidizado, a secagem, a volatilização, ignição e a combustão tem lugar no espaço livre acima do leito fluidizado (*freeboard*), a temperatura geralmente, entre 850 e 950 °C. O incinerador de leito fluidizado é uma câmara de combustão revestida em forma de um cilindro vertical Figura 2.5. Normalmente usa-se um leito de material inerte (por exemplo, areia ou cinza) sobre uma grelha ou placa de distribuição. Os resíduos para incineração é alimentado continuamente no leito de areia de leito fluidizado a partir do topo ou na lateral (IPPC, BREF, 2006). Um reator de leito fluidizado é um reator heterogêneo em que existem duas regiões principais:

- na primeira região há uma elevada concentração de sólidos em suspensão num fluido gasoso ascendente, constituindo o leito fluidizado;

- (ii) na segunda região há uma pequena concentração de sólidos, designada por freeboard ocupando normalmente a maior parte do reator

A secção inferior do reator de leito fluidizado é normalmente coberto de material refratário para proteger as áreas metálicas expostas da erosão. A temperatura do leito pode ser controlada pela recirculação de gases de combustão e os picos de temperatura extremas, se consegue controlar através da injeção de água. O “start-up” do reator é conseguido usando gás ou queimadores a óleo montado na zona de combustão. Uma vez que é alcançada a temperatura necessária, os resíduos podem ser introduzidos. Os queimadores adicionais são montados por cima do bordo livre para manter a temperatura correta de combustão de combustível sob condições pobres ou húmidos (CIWM, 2010).

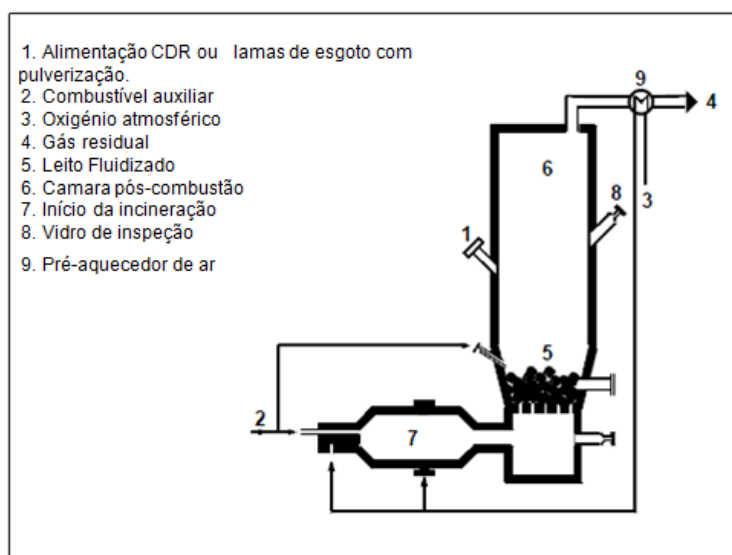


Figura 2.5 – Incineração em leito fluidizado [Fonte: IPPC, BREF, 2006].

A drenagem e secagem podem ser utilizadas para o pré-tratamento para que a incineração de resíduo, seja possível sem usar um combustível auxiliar. O calor do processo pode ser recuperado e ser utilizado para a processos de secagem de resíduos (IPPC, BREF, 2006). Esta tecnologia é muito eficaz na combustão de misturas de resíduos, que podem também apresentar um grande conteúdo de inertes, pois permite a remoção simultânea de SO_2 , NO e HCl , exigindo apenas que o material apresente uma granulometria pequena, como já foi mencionado. Um exemplo de uma incineradora de leito fluidizado é TIR Madrid (Tratamiento Integral de Resíduos de Madrid), situado em Valdemingomé, em que a unidade de incineração dispõe de três reatores de leito fluidizado borbulhante, e que são alimentados com 260000 ton CDR/ano. O tempo médio de residência dos resíduos no leito é de quatro minutos. De modo a retardar a combustão

e para manter a temperatura do leito a 670°C, o gás de combustão é reciclado e são injetados por cima do leito até 2500mg/h de água. No *freeboard*, são atingidas temperaturas de 900°C. Cada caldeira tem uma potência nominal de 41 ton/h de vapor a uma temperatura de 420°C e uma pressão de 46 bar. Nestas condições são produzidos 29 MWe (CIWM,2010).

2.5 EMISSÕES

A incineração produz substâncias sólidas e gasosas, algumas das quais poluentes, pelo que exige dispositivos adequados de tratamento. Os principais produtos gasosos, após os processos de tratamento de efluentes gasosos são: poeiras, CO₂, CO, H₂O, SO_x, NO_x, HCl, O₂, HF, metais pesados, dioxinas e furanos. O controlo das emissões gasosas nas centrais de incineração é constante, visto que estão definidos valores limite de emissão (DL nº 85/2005 de 28 de Abril). A aplicação de um sistema de remoção de partículas dos gases de exaustão é essencial em todas as instalações de incineração (IPPC, BREF, 2006).

A emissão de poluentes pelas instalações de incineração de resíduos e atualmente limitada devido à tecnologia que incorpora estes sistemas. Durante a combustão dos resíduos os vários elementos químicos são mais ou menos mobilizados para formar novas substâncias (óxidos, gases) ou mudam de estado físico após o que acompanham as diferentes correntes materiais: escórias, gases e poeiras volantes. Às elevadas temperaturas da câmara de combustão ocorre a volatilização de alguns metais.

Os produtos sólidos podem ser divididos em dois grupos: escórias e cinzas volantes. As escórias são um subproduto direto da combustão e representam a maior parte dos sólidos, apresentam um baixo grau de perigosidade e são constituídas principalmente por material inerte particulado, compostos inorgânicos e metais. O seu destino pode não ser necessariamente o aterro, pois em alguns casos são utilizadas como componente de construção em estradas ou na produção de betão. Já as cinzas volantes, originárias dos processos de tratamento de efluentes gasosos, necessitam de ser geridas como resíduo perigoso, pois apresentam um elevado grau de metais pesados (nomeadamente mercúrio, cádmio, zinco e chumbo), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, dioxinas e furanos. Assim, são geralmente sujeitas a processos de estabilização e/ou solidificação para posterior deposição em aterros específicos para este tipo de resíduos (Williams, 2005).

Na Tabela 2.4 encontram-se os valores limite de emissão para as médias diárias dos poluentes. Como se pode ver na Tabela alguns VLE sofreram alterações, no sentido da sua diminuição, devido a entrada em vigor do Decreto-Lei nº 85/2005 e, posteriormente, da licença ambiental nº 96/2007, como é o caso dos VLE para as médias diárias de HCl, SO₂, NO_x e CO. Para as partículas, COT, HF e NH os VLE para as médias diárias não sofreram alterações entre 2000 e 2009.

Tabela 2.4 - Valores - limite de emissão para as médias diárias de partículas totais, HCl, COT, HF, SO₂, NO_x, CO e NH₃ [Adaptado de Decreto-Lei nº85/2005].

Poluente	VLE para médias diárias (mg/Nm ³)		
	Até 2005	Após 2005	Após 2008
Partículas totais	10	10	10
Ácido clorídrico (HCl)	20	10	8
Substâncias orgânicas em forma gasosa e de vapor, expressas em carbono orgânico total (COT)	10	10	10
Ácido fluorídrico (HF)	1	1	1
Dióxido de enxofre (SO ₂)	60	50	40
Óxidos de azoto (NO _x), ou a soma das concentrações de monóxido de azoto (NO) e dióxido de azoto (NO ₂),	250	200	180
Monóxido de carbono (CO)	50	50	30
Amoníaco (NH ₃)	10	10	10

A incineração tem como vantagens a redução do volume e peso dos resíduos, além da possibilidade de recuperação de energia, por meio de reaproveitamento direto via conversão térmica. No entanto, a eficiência térmica da incineração é discutida, devido a geração dos gases (CO₂, SO₂ e N₂) provenientes da combustão, além das dioxinas (queima de plásticos) e CO e partículas (combustão incompleta). A melhoria da qualidade do ar, nas últimas décadas, foi um dos grandes êxitos da política comunitária em matéria de ambiente (APA, 2013).

Os equipamentos de tratamento dos gases de combustão representam uma parte considerável do investimento total gastos com todos os equipamentos instalados. O sistema de tratamento inclui um lavador de gases onde é injetada uma suspensão de cal (Ca(OH)₂), a qual permite a neutralização dos componentes ácidos (HCl, HF, SO₂, NO_x) sob a forma de sais de cálcio. A injeção de cal é feita através de um atomizador, que divide a solução em gotículas minúsculas, permitindo que sais formados sejam

arrastados na corrente gasosa e retirados, conjuntamente com as poeiras, nos precipitadores electrostáticos.

As partículas geradas durante a combustão, ou resultantes da lavagem dos gases, são removidas com sistemas de despoeiramento. Os precipitadores eletrostáticos, os filtros de manga, têm uma eficiência de remoção elevada para as partículas de grandes e pequenas dimensões, principalmente os filtros de manga são eficientes na remoção de partículas muito finas (Formosinho S., *et al.* 2000). É aplicada uma corrente elétrica de alta tensão que carregam eletricamente as partículas de poeiras resultantes da combustão, as chamadas cinzas volantes (*fly ash*), e os sais resultantes da reação com a cal, atraindo-as para as placas de colecta (os elétrodos positivos dos precipitadores), a partir das quais são periodicamente removidas e depois descarregadas pelo fundo. As partículas retiradas pela base dos precipitadores são encaminhadas para silos de armazenagem, de onde são retiradas regularmente e são transportadas para aterro. Nestas condições os gases que saem pela chaminé são praticamente incolores, não sendo visível qualquer fumo, em virtude do tratamento aplicado (IPPC, BREF 2006).

2.6 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS

A recuperação de energia no âmbito do tratamento termoquímico de resíduos apresenta-se com múltiplos aspetos e genericamente inclui os processos de incineração (combustão) por um lado e os processos de tratamento térmico avançado como pirólise e gasificação, por outro. As diferenças entre os diferentes processos estão na forma como os resíduos são processados, nomeadamente em relação à presença de oxigénio e à forma de recuperação de energia, ou seja na combustão há lugar a uma libertação direta de energia térmica, enquanto na pirólise e gasificação formam-se produtos secundários combustíveis a partir dos quais se pode também gerar energia mecânica através de processos que não estão acessíveis diretamente à combustão de sólidos (turbinas a gás, por exemplo).

A recuperação de energia a partir dos resíduos por processos termoquímicos tem por objetivo a produção de trabalho mecânico, geralmente sob a forma de energia elétrica para consumo interno e introdução na rede pública de distribuição, e ainda a produção de calor residual utilizado em aplicações de produção de vapor de baixa entalpia, aquecimento de ar ou água quente para o consumo industrial e/ou doméstico (*district heating*, cogeração).

Tabela 2.5 - Eficiência para diferentes tipos de recuperação de energia [Fonte: adaptado de WBTGR, 1999]

Sistema de recuperação de energia	Recuperação de energia		Eficiência de recuperação global
Calor	Calor	80%	80%
Vapor	Vapor	80%	80%
Elettricidade	Elettricidade	35%	35%
Vapor e eletricidade	Vapor	0-75%	35-75%
	Elettricidade	0-35%	
Calor e eletricidade	Calor	60-65%	85%
	Elettricidade	20-25%	

Nota: A eficiência global é calculada em base do poder calorífico inferior do resíduo.

Como se pode verificar na Tabela 2.5, a incineração de resíduos permite recuperar até 35% de energia sob a forma de eletricidade a partir de tecnologia de turbinas com condensação, sendo que a energia restante é perdida na forma de calor para o meio ambiente, pois que o fluido de arrefecimento apresenta uma baixa entalpia e não têm grande interesse para aplicações em processos industriais, a menos que exista alguma aplicação local com interesse.

Enquanto a produção de calor de processo e eletricidade, é possível recuperar até 85% da energia disponível nos resíduos. Possuindo uma caldeira apropriada para a incineração de resíduos (com parâmetros moderados de operação) é possível de obter uma eficiência de 20-25 % para a eletricidade e de 60-65% para o calor (ver Tabela 2.5.) Para a produção de vapor de processo e eletricidade, a eficiência de recuperação está situada entre os valores de produção de eletricidade 35% e para os valores de produção de calor e eletricidade de 20% dependendo da quantidade de vapor extraído. Para evitar perdas de calor, as indústrias que necessitam de vapor de processo, devem ser situadas perto das unidades de incineração (WBTGR, 1999).

3 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

O processo de recuperação de energia a partir da incineração resíduos não difere essencialmente do processo de recuperação de energia a partir dos combustíveis, assentando no desenvolvimento da reação de combustão dos resíduos na presença de oxigénio que é uma reação exotérmica, ou seja que liberta calor sob a forma de produtos gasosos a alta temperatura. A recuperação de energia não é mais do que transferir essa energia para formas úteis de energia em trânsito nomeadamente eletricidade, vapor, água quente ou produtos combustíveis.

3.1 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA MECÂNICA E DE CALOR

A tecnologia de recuperação de energia mecânica e calor a partir de sistemas de combustão é bem conhecida e desenvolvida. Necessita contudo de ser otimizada tendo em conta as especificidades das unidades de produção de energia térmica, o combustível (ou os resíduos) e as condições instantâneas da incineração.

No caso da combustão dos combustíveis sólidos (carvão ou resíduos) a tecnologia passa geralmente pelo uso de um ciclo Rankine usando como fluido circulante a água líquida/vapor de água. O fluido circulante é movimentado produzindo trabalho de expansão de vapor (em turbinas) ou consumindo trabalho mecânico de compressão de líquido (nas bombas) e recebendo calor (em caldeiras) ou cedendo calor (em condensadores). Nestas condições é gerado trabalho mecânico líquido sob a forma de trabalho de veio da turbina (*shaft work*) que pode ser utilizado para movimentar um alternador de geração de energia elétrica e assim entregar potência elétrica à rede de distribuição de energia elétrica. Em outras situações para além de trabalho mecânico é possível recuperar ainda calor de processo, sob a forma de extração de vapor a baixa pressão.

O rendimento do processo de produção de trabalho mecânico está dependente da pressão e temperatura iniciais e da pressão final. Nos processos de incineração com recuperação de energia é corrente uma pressão inicial dentre 40 a 65 bar e uma temperatura cerca de 400°C; a pressão final no caso de turbinas de condensação podem atingir 0,2 bar absoluto (condição subatmosférica) e no caso das turbinas com extração, podem ficar pelos 5 a 8 bar.

3.2 CICLO DE RANKINE

O vapor de água é usado como meio de geração, transporte e utilização de energia desde os primórdios do desenvolvimento industrial. Inúmeras razões colaboraram para a geração de energia através do vapor. O ciclo de Rankine a vapor permite transformar energia de pressão contida no vapor em energia mecânica. Os principais componentes de um ciclo de potência a vapor são: a bomba, caldeira, turbina e condensador e o fluido operante que neste caso é a água com as seguintes características termodinâmicas, Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades da água

Peso molecular	18 kg / kmol
Ponto de ebulição	373,15 K, 101.325 kPa
Ponto de congelação	273,15 K, 101.325 kPa
Ponto triplo	273,16 K, 0.611 kPa
• Ponto crítico: 647 K	647 K, 22,06 MPa
• Calor latente:	2256,6 kJ/kg-101.325 kPa
Calor específico:	4,18 kJ / kg K

As vantagens da água como fluido de trabalho são:

- Muito boa estabilidade térmica / química (não há risco de decomposição);
- Viscosidade muito baixa (menos trabalho bombeamento obrigatório);
- Bom portador de energia (alto valor do calor latente e calor específico);
- Não-tóxico, não-inflamável e não há ameaça para o meio ambiente;
- Barato e abundante (presente em quase toda parte na terra).

O ciclo de Rankine é o ciclo ideal das centrais térmicas a vapor. O ciclo ideal de Rankine não envolve quaisquer irreversibilidades internas e consiste em quatro processos. Numa bomba entra água no estado 3 como líquido saturado, sendo comprimida isentropicamente até a pressão de serviço da caldeira. Durante este processo, a temperatura aumenta, devido a ligeira diminuição do volume específico da água. A água entra na caldeira como líquido comprimido no estado 4, saindo como vapor sobreaquecido no estado 1. O vapor sobreaquecido no estado 1 entra na turbina onde é expandido isentropicamente, produzindo trabalho, pela rotação do veio ligado a gerador elétrico. Durante este processo a temperatura e a pressão do vapor descem para os

valores do estado 2, e o vapor entra no condensador. Neste estado o vapor encontra-se geralmente na fase saturada e com elevado título. O vapor é condensado a pressão constante no condensador, que é basicamente um permutador de calor de grandes dimensões, pela rejeição de calor para o meio de arrefecimento, seja um rio, ou a atmosfera. O vapor sai do condensador como líquido saturado e entra na bomba como líquido saturado no estado 3 (Neto F., (2011), Çengel Y., (2001), Oliveira P., (2012)).

Na Figura 3.1 está representado a diagrama T-s de um ciclo térmico de Rankine a vapor ideal e real, com as respetivas irreversibilidades.

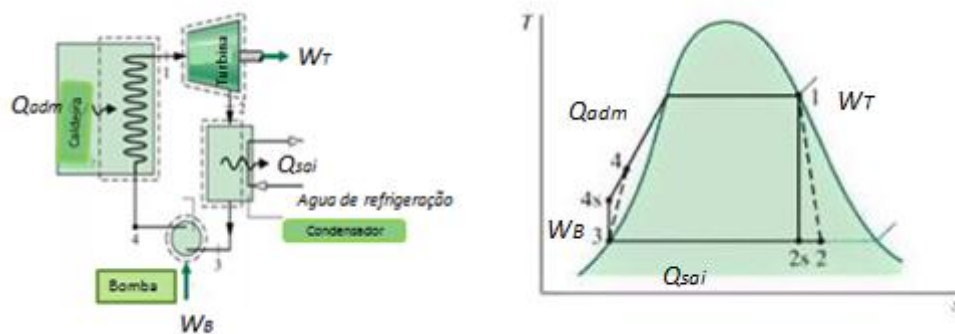


Figura 3.1 - Ciclo simples de Rankine e respetivo diagrama T-s [Fonte: adaptado de Neto F., 2011].

O ponto 1 corresponde a saída da caldeira, com o vapor produzido a ser entregue a turbina. A linha 1-2 corresponde a expansão do vapor dentro da turbina, sendo a etapa onde é produzido trabalho mecânico no ciclo (W_T). O ponto 3 corresponde a água saturada que sai do condensador na fase líquida, e a linha 2-3, corresponde ao processo de condensação. Nesta etapa dá-se a rejeição de calor para o meio, fonte fria do ciclo térmico (Q_{sai}). O ponto 4 corresponde a saída da bomba de alimentação, a alta pressão e a linha 3-4 corresponde a etapa de bombeamento da água de alimentação, com o consumo de trabalho mecânico (W_B). A linha 4-1 ocorre dentro da caldeira com o calor fornecido ao ciclo pela queima do combustível com ar atmosférico (Q_{adm}), com aquecimento, ebulição e sobreaquecimento do vapor. Nesta etapa, há lugar a aumento da entalpia do fluido, por intermédio de absorção de calor a partir da fonte quente.

Qualquer pequeno aumento do rendimento em trabalho de um ciclo de funcionamento das centrais térmicas, traduz-se numa enorme poupança de energia. Para um ciclo de Rankine as melhorias para aumentar o rendimento seria a diminuição da pressão do condensador, o que diminui a temperatura do vapor ou seja a temperatura à qual o calor

é rejeitado para o meio ambiente- A redução da pressão no condensador induz efeitos secundários, por um lado aumenta o teor de condensados no vapor nos estágios finais da turbina, o que é indesejável, devido a diminuição do rendimento da turbina e devido a corrosão.

Uma outra medida de aumento do rendimento seria o sobreaquecimento do vapor a temperaturas elevadas, aumentando a temperatura média à qual é fornecido o calor na caldeira, mesmo sem aumentar a pressão da mesma. O efeito global é de aumentar o rendimento térmico, tendo em consideração que a temperatura da fonte quente é mais elevada. Contudo o aumento da temperatura de sobreaquecimento é limitado por propriedades dos materiais utilizados na fabricação dos equipamentos.

Outra forma de aumentar a temperatura média durante o processo de adição de calor consiste em aumentar a pressão de serviço na caldeira, que iria aumentar a temperatura de ebulição. Isto por sua vez iria aumentar a temperatura média a qual o calor é fornecido ao vapor de água, aumentando o rendimento térmico do ciclo. Mas o aumento de pressão de serviço em contrapartida para uma dada temperatura de entrada na turbina, aumente o teor de humidade a saída da turbina. Portanto, uma solução para isto seria o reaquecimento do vapor. O ciclo que admite o reaquecimento de vapor difere do ciclo simples de Rankine, pelo facto de que o vapor é expandido isentropicamente até uma pressão intermédia, sendo reenviado para a caldeira onde é reaquecido a pressão constante, normalmente até à temperatura de entrada do primeiro estágio. O vapor então é expandido no segundo estágio (turbina de média ou baixa pressão), até à pressão do condensador (Çengel Y., 2001).

Também uma forma de aumentar o rendimento de um ciclo de Rankine é através da regeneração, que é um processo viável e que é obtido pela extração do vapor da turbina em vários locais, Este vapor que poderia produzir mais trabalho, é utilizado para o pré-aquecimento da água de alimentação à caldeira, fazendo com que o diferencial de temperatura a suportar pela caldeira seja menos extremo e assim dando-lhe uma vida útil mais longa. Durante este processo, a água líquida, a água de alimentação a saída da bomba é aquecida por vapor extraído da turbina a uma pressão intermédia em dispositivos denominados aquecedores de água de alimentação. Se a regeneração é de tipo aberta os dois caudais são misturados em aquecedores de água de alimentação abertos e a mistura sai na fase de líquido saturado à pressão do aquecedor. Se a regeneração é de tipo fechada, o calor é transferido do vapor extraído para a água de alimentação sem mistura, pelo que os caudais podem estar a pressão diferente um do

outro. A regeneração não só melhora o rendimento, mas também permite a extração de ar da água de alimentação (infiltrada no condensador) (Çengel Y., 2001).

3.3 TECNOLOGIAS ASSOCIADAS AO USO DO CICLO DE RANKINE

O ciclo de Rankine tem associado vários componentes onde decorrem os vários processos, nomeadamente a caldeira, a turbina, a bomba e o condensador. A Figura 3.2 mostra um esquema de uma central que utiliza o ciclo de Rankine e o posicionamento em que os diversos componentes tecnológicos se encontram.

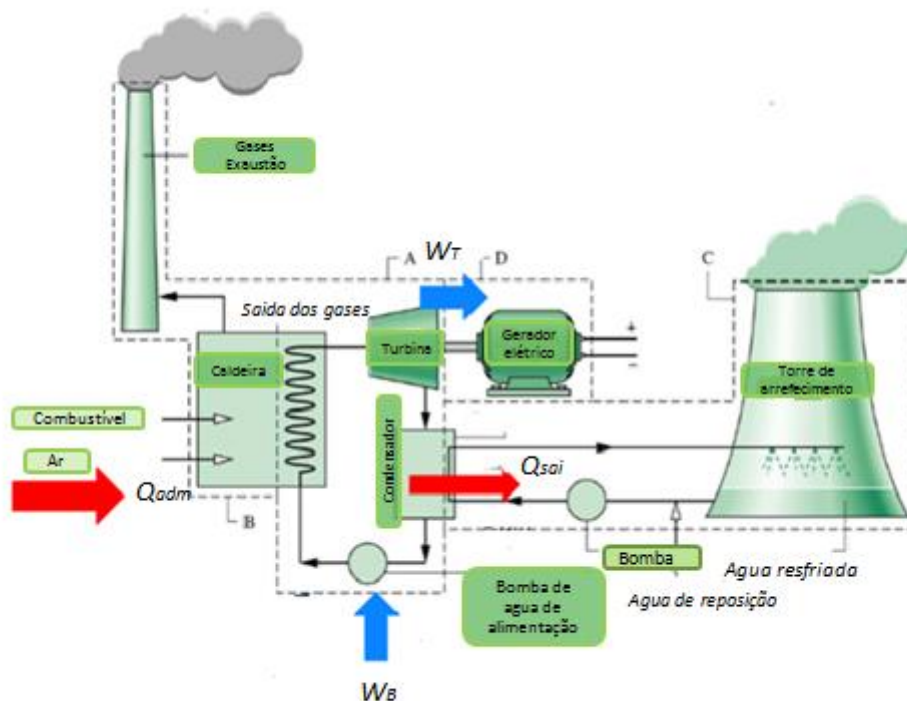


Figura 3.2 - Esquema de uma central térmica de ciclo de Rankine [Fonte: adaptado de Neto F., 2011].

A combustão dum combustível fornece a potência térmica necessária à caldeira para aquecer, evaporar e sobreaquecer vapor, que uma vez expandido na turbina realiza trabalho mecânico de rotação (*shaft work*), que é transmitido a um gerador elétrico, onde por efeito eletromagnético, é convertida em energia elétrica. No condensador é utilizada água fria ou ar atmosférico para arrefecimento do condensado, que vai ser transportado de novo para a caldeira, com ajuda de uma bomba, consumindo energia mecânica.

3.3.1 COMPONENTES DO CICLO DE RANKINE

3.3.1.1 CALDEIRA

A combustão é um processo exotérmico (geradores de calor). A maior parte da energia produzida durante a combustão é transferido para os efluentes gasosos na caldeira.

O arrefecimento do gás de combustão permite:

- a recuperação da energia dos gases quentes da combustão;
- a limpeza de efluentes gasosos antes de serem liberados para a atmosfera.

Nas incineradoras sem recuperação de calor, os gases são normalmente arrefecidos por injeção de água, de ar, ou ambos.

A caldeira corresponde ao conjunto de permutadores através do arrefecimento dos gases de combustão e o aproveitamento do calor sensível destes gases para o circuito de água/vapor a alta pressão que faz parte do ciclo Rankine. Em contracorrente com os gases circula a água através de um primeiro permutador de calor, denominado economizador, onde a água líquida proveniente de uma bomba de alta pressão aquece até atingir a ebulição em contacto com os gases já arrefecidos; em seguida a água é evaporada no permutador designado de ebulidor, em contacto com os gases a temperaturas intermediárias; o vapor de água assim produzido é finalmente sobreaquecido no permutador que se designa de sobreaquecedor que se encontra em contacto com os gases muito quentes originados diretamente da combustão. A eficiência de uma caldeira está relacionada diretamente com a temperatura de saída dos gases de escape da caldeira. Quanto menor a temperatura dos gases, maior será a eficiência da caldeira. O balanço energético é representado pela Eq 3.1, onde \dot{Q}_{adm} é a potência térmica disponível na caldeira.

$$\dot{Q}_{adm} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (\text{Eq. 3.1})$$

3.3.1.2 BOMBAS

A bomba de água serve para aumentar a pressão do fluido operante (água líquida) no ciclo a vapor, de forma a movimenta-lo até a entrada da caldeira. Compressão não isentrópica na bomba o que implica um maior consumo de potência.

$$\dot{W}_{B,real} = \dot{m}(h_4 - h_3) = \dot{m}[c(T_4 - T_3) + v(P_4 - P_3)] \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Em condições isentrópicas, o trabalho requerido pela bomba é menor, sendo dado por:

$$\dot{W}_{B,ideal} = \dot{m}(h_{4s} - h_3) = \dot{m} \nu (P_{4s} - P_3) \quad (\text{Eq. 3.3})$$

O rendimento isentrópico (ideal) da bomba será:

$$\eta_B = \frac{\dot{W}_{B,ideal}}{\dot{W}_{B,real}} = \frac{\dot{m}(h_{4s} - h_3)}{\dot{m}(h_4 - h_3)} = \frac{(h_{4s} - h_3)}{(h_4 - h_3)} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

3.3.1.3 CONDENSADOR

A função do condensador é a de condensar o vapor após expansão na turbina, e transformá-lo em líquido, rejeitando o restante conteúdo energético para o meio ambiente. Como não há qualquer trabalho a atravessar a fronteira do sistema, o balanço energético ao condensador será:

$$\dot{Q}_{sai} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (\text{Eq. 3.5})$$

3.3.1.4 MODELO DE TURBINA A VAPOR COM EXTRAÇÃO

A turbina a vapor é uma máquina rotativa que consome trabalho de expansão do vapor de água transformando-a em energia mecânica. A sua maior aplicação é no acionamento de bombas, compressores e geradores de energia elétrica. Do ponto de vista termodinâmico a turbina a vapor ocupa uma posição favorável, transformando em energia mecânica uma parte relativamente grande parte da energia térmica que consome. Apresenta uma eficiência que pode ser considerada boa, especialmente nas turbinas de grandes capacidades acionadas por vapor de alta pressão. O princípio de funcionamento é baseado na conversão de energia calorífica em energia cinética. Ao passar por um rotor dotado de alhetas engastadas no mesmo, o vapor de alta pressão se expande, perdendo pressão e temperatura, cedendo parte de sua energia ao rotor da turbina, realizando assim a conversão termomecânica através do trabalho realizado pelo gás (vapor) durante sua expansão. As figuras a seguir apresentam uma turbina a vapor:

- Com extração – condensação: parte do vapor de alta pressão admitido é condensado e outra parte gera vapor de pressão inferior (extração). Eventualmente, pode operar na condição de condensação total. É o principal elemento de ajuste da procura de energia elétrica e de vapor de uma unidade industrial (balanço termoelétrico);

- Contrapressão: todo o vapor de alta pressão é convertido em vapor de pressão inferior. Este, por sua vez, será utilizado em outros processos ou turbinas, podendo ser reaproveitado (condensado) para geração de vapor;

O rendimento de uma turbina comercial é um dado normalmente fornecido indiretamente pelo fabricante, através da sua eficiência isentrópica. A eficiência isentrópica é definida como a razão entre o salto entálpico real do vapor através da turbina e o salto entálpico teórico, se mantida a entropia constante. No caso da turbina, a eficiência é definida pela relação entre o trabalho real produzido e o trabalho ideal isentrópico. A expansão não isentrópica na turbina o que implica uma menor produção de potência. Como as variações de energia cinética, potencial e perdas térmicas podem ser desprezadas, a equação para a eficiência da turbina se torna:

$$\dot{W}_{T,real} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (\text{Eq. 3.6})$$

$$\dot{W}_{T,ideal} = \dot{m}(h_1 - h_{2s}) \quad (\text{Eq. 3.7})$$

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_{T,real}}{\dot{W}_{T,ideal}} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_2)}{\dot{m}(h_1 - h_{2s})} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{2s})} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Onde η_{turbina} é a rendimento isentrópico da turbina, \dot{W}_T real / ideal são os trabalhos de eixo produzidos pela turbina (real / ideal) e $h_1 / h_2 / h_{2s}$ são as entalpias específicas das correntes de entrada e de saída, respetivamente.

Assim como assumido para a turbina, as variações de energia potencial, cinética e perdas térmicas são desprezáveis na análise da maioria das turbinas reais. Tanto para a turbina quanto para a bomba, também devem ser consideradas, na análise de eficiência da central termoeletrica, as ineficiências (Neto F., (2011), Çengel Y., (2001)).

3.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO

A análise de desempenho energético de uma instalação de incineração afigura-se de grande interesse operacional e económico. No âmbito deste trabalho foram ensaiados duas aplicações de análise: uma respeitante ao balanço mássico e energético e outro respeitante ao funcionamento do ciclo de vapor e à energia em trânsito.

3.4.1 APLICAÇÃO DE BALANÇO MÁSSICO E ENERGÉTICO

A partir da formulação base em Excel do balanço mássico e energético aplicado à incineração de resíduos, apresentado nas seções 2.1 e 2.2, foi desenvolvida uma nova aplicação tendo em vista a simulação do processo de combustão de resíduos na presença de gás natural.

Esta aplicação parte da composição dos resíduos em termos dos diferentes componentes (orgânicos, papel, plástico, *etc.*), calcula a composição elementar, o poder calorífico e o teor de humidade, para depois, em função de um excesso de ar especificado, calcular a quantidade e a composição dos produtos maioritários de incineração. Em seguida e em função da temperatura dos produtos de combustão, a aplicação determina a quantidade de energia disponível. A base de cálculo é a unidade de massa de resíduos em base seca.

Esta aplicação foi desenvolvida para calcular a quantidade de energia associada à incineração de resíduos no caso de estudo, comparar a composição dos produtos no efluente, a produção de energia, o consumo de combustível auxiliar em função do teor de humidade, *etc.*

3.4.2 APLICAÇÃO CYCLEPAD

Um modelo básico de um ciclo termodinâmico de Rankine deve incluir quatro processos fundamentais, nomeadamente: aquecimento com produção de vapor sobreaquecido (caldeira), expansão (turbina), arrefecimento com condensação (condensador) e compressão (bomba). Neste âmbito importa referir que cada um dos processos é caracterizado sob o ponto de vista termodinâmico por um conjunto de relações que traduzem as características das funções de estado do fluido operante entre a entrada e saída de cada processo, nomeadamente temperatura, pressão, composição, entalpia, entropia, energia interna, volume, *etc.* expressos em termos específicos (propriedades intensivas) ou tendo em conta o caudal mássico. Nestas circunstâncias é possível determinar os fluxos de energia e calor em trânsito. Por uma questão de simplicidade e facilidade de análise, é usual considerar simplificações na forma como alguns dos processos decorrem, e assim definem-se processos isobáricos (pressão constante), isotérmicos (temperatura constante), adiabáticos, isentálpicos, isentrópicos,

Na realidade dos processos, em que se procura maximizar o rendimento mecânico, mas simultaneamente a satisfação de necessidades de calor, ocorre assim uma enorme

diversidade de ciclos Rankine que podem incluir processos/dispositivos adicionais, nomeadamente: laminagem, reaquecimento, permuta, desgaseificação, injeção de vapor. Estes processos são traduzidos por equações de balanço energético e mássico específico. Adicionalmente importa ainda ter em conta a não idealidade dos processos.

Assim a análise de um processo real, mesmo que assente em pressupostos simplificadores, pode ser realmente extensa (e portanto difícil) de simular se realizada manualmente. Felizmente o desenvolvimento dos meios de cálculo permite que atualmente este tipo de análise possa ser realizado com muito mais facilidade e rigor.

A aplicação Cyclepad foi desenvolvida para a modelização do ciclo termodinâmico de Rankine permite a construção, a análise e a simulação de uma ampla variedade de problemas. Acresce ainda que a aplicação em causa possui uma ampla base de dados de suporte ao cálculo das propriedades termodinâmicas de substâncias, essenciais para qualquer estudo termodinâmico.

No âmbito deste trabalho foi feito uso extensivo do software Cyclepad, como se detalhará adiante.

4 CASO DE ESTUDO: LIPOR

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA LIPOR

Constituída em 1982, a LIPOR – Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto é uma empresa intermunicipal criada com o objetivo de gerir o destino final dos resíduos urbanos de um conjunto dos oito municípios associados: Espinho, Gondomar, Maia, Matosinhos, Porto, Póvoa de Varzim, Valongo e Vila do Conde, correspondendo a uma área total de 646 km², e uma população próxima de 1 milhão de habitantes.

A densidade populacional varia entre os 499 habitantes por km² (Vila do Conde) e os 6.341 habitantes por km² (Porto), sendo a respectiva média de 1.505 habitantes por km², Figura 4.1.

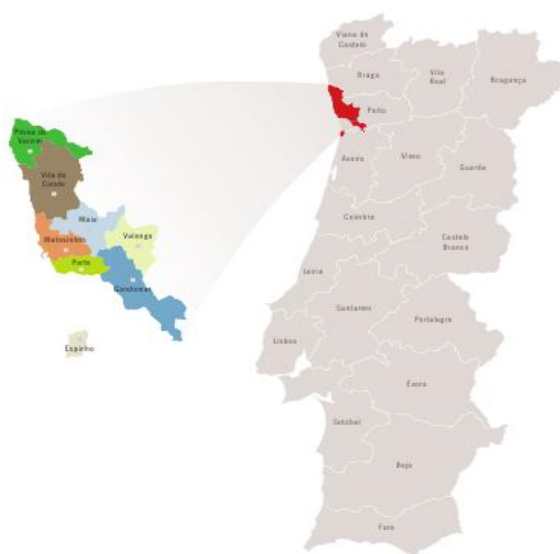


Figura 4.1 - Posicionamento geográfico da LIPOR

A caracterização de toda a envolvente do Sistema de Gestão de Resíduos (Recursos) da LIPOR, nomeadamente a nível da distribuição populacional, respetiva localização geográfica, da tipologia das habitações, dos estabelecimentos comerciais e das indústrias, entre outros fatores, é extremamente importante, pois para além de influenciar o tipo de resíduos produzidos, permitem determinar qual a logística de recolha mais apropriada e, em particular, perceber qual o destino final mais adequado a dar aos resíduos produzidos consoante a sua origem.

Desde cedo a LIPOR implementou a gestão integrada de resíduos através da recuperação, ampliação e construção de infraestruturas, complementadas com campanhas de sensibilização junto da população.

Neste âmbito dotou-se de um conjunto de infraestruturas de suporte à gestão integrada de resíduos de tratamento, valorização e eliminação de resíduos, dispondo de uma equipa multidisciplinar que trabalha na área da prevenção e redução de resíduos, educação ambiental para sustentabilidade com a população dos seus associados, promovendo projetos próprios (Horta da Formiga, parque Aventura, etc.) ou associando-se a projetos de diferentes parceiros (programas de educação ambiental).

4.1.1 PRODUÇÃO DE RESÍDUOS

Numa perspetiva nacional, apesar de representar apenas 0,7% da área do território de Portugal Continental, concentra cerca de 10% da população e é responsável pela produção anual de cerca de 10% do total nacional de resíduos urbanos. A Tabela 4.1 mostra as quantidades anuais geridas pela LIPOR.

A título de exemplo mostra-se na mostra a quantidade e natureza dos resíduos urbanos produzidos de janeiro a outubro de 2013 (ver Figura 4.2).

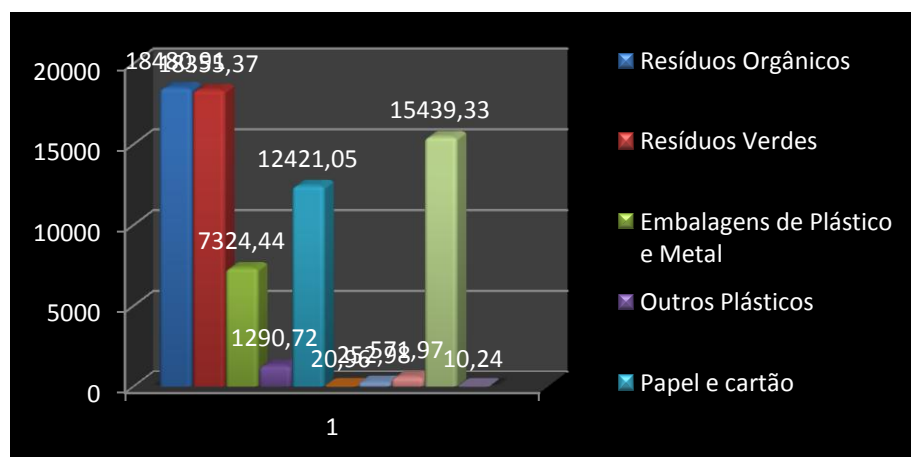


Figura 4.2 - Resíduos recebidos de Janeiro a Outubro de 2013 (ton) pela LIPOR [Adaptado Lipor, 2013].

4.1.2 INFRA-ESTRUTURAS DE GESTÃO DE RESÍDUOS

Em 2012, o impacto das medidas de austeridade e da contração da economia portuguesa e europeia, levaram a que as condições da economia portuguesa fossem fortemente

marcadas por uma instabilidade económica e financeira com repercussões significativas no consumo das famílias e na atividade das empresas. Uma tendência que já se tinha verificado em 2011, mas que se acentuou em 2012, foi que esta crise económica está a levar os portugueses a produzirem menos resíduos, reflexo da diminuição do consumo. Assim, durante o ano de 2012, a LIPOR recebeu nas diferentes unidades operacionais de valorização e tratamento de resíduos, um total de 481,037 toneladas de resíduos, o que representa um decréscimo de aproximadamente 7% como se ver Tabela 4.1 face ao ano anterior. A quantidade de resíduos encaminhados para a valorização energética diminuiu em 0,13 % face ao ano 2011. É, entretanto, de destacar em 2012, é reduzida a quantidade de resíduos (1254 ton) que não tem valorização energética e que foi confinada em Aterro Sanitário. Empenhada em cumprir os objetivos nacionais e comunitários de limitar ao máximo a deposição de resíduos em Aterro, a LIPOR, apenas depositou naquela infraestrutura cerca de 0,3% dos seus resíduos sólidos. Este facto reflete a preocupação constante da LIPOR em promover a adequada valorização e tratamento de resíduos (Lipor,2013).

Tabela 4.1 - Encaminhamento de resíduos para destino final (ton) [Adaptado: Lipor, 2013].

Destino Final	2010	2011	2012
Reciclagem multimaterial (ton)	58,591	55,153	44,098
Valorização orgânica (ton)	47,308	46,140	44,062
Valorização energética (ton)	378,692	392,140	391,623
Confinamento técnico (ton)	57,835	21,399	1,254
Total	542,426	514,832	481,037

O modelo de gestão de resíduos urbanos que a LIPOR preconiza, assenta na hierarquia da gestão dos resíduos. A LIPOR é responsável pela recolha seletiva dos fluxos de resíduos de vidro, de papel-cartão e de embalagens (plástico e metal) dispondo ainda de 22 ecocentros.

A LIPOR é responsável pela recolha seletiva de bio-resíduos junto de grandes operadores (restaurantes, mercados, etc.) que encaminha para a central de valorização orgânica diretamente. Esta central recebe ainda diretamente resíduos verdes de jardins e resíduos dos cemitérios após um pequeno procedimento de separação de contaminantes. Após um período de tratamento de cerca de 3 meses obtém-se um

produto com propriedades de condicionador do solo contendo nutrientes, com elevada procura no mercado.

Os resíduos urbanos recolhidos de forma indiferenciada são recolhidos pelos municípios e entregues para eliminação na unidade de incineração; os refugos das unidades de triagem e da valorização orgânica são também enviados para incineração. A unidade de incineração produz uma importante mais-valia que é eletricidade que introduz na rede elétrica nacional; produz ainda resíduos de sucata ferrosa que são enviados para a indústria de fundição. Os resíduos sólidos da incineração inclui que escórias e os resíduos de tratamento de efluentes gasosos são objeto de inertização e enviados para aterramos.

O aterro da LIPOR recebe os resíduos de incineração e também os resíduos indiferenciados sempre que a unidade de incineração fica fora de serviço, durante os períodos de manutenção; o aterro dispõe de um sistema de tratamento de lixiviados.



Figura 4.3 - Encaminhamento dos resíduos urbanos indiferenciados na LIPOR.

4.1.3 COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DA LIPOR

A caracterização de resíduos sólidos é um processo que pretende identificar a quantidade de objetos e materiais resultantes da transformação e utilização de bens de consumo. Composição é assim o termo utilizado para descrever os componentes individuais que constituem o fluxo de resíduos e a sua distribuição relativa nesse grupo, recorrendo geralmente a valores percentuais em peso. A composição dos resíduos a incinerar é um aspeto importante pois condiciona a libertação de energia útil, a temperatura de incineração e/ou as necessidade de combustível auxiliar. Neste âmbito o teor de humidade dos resíduos tem muita importância.

A quantidade de energia térmica libertada pela combustão dos resíduos depende diretamente do poder calorífico dos resíduos e inversamente do conteúdo de humidade. Poder calorífico dos resíduos urbanos depende dos componentes que estes apresentam. O elevado conteúdo em plásticos ou em papéis dos resíduos a incinerar reforça o poder calorífico, enquanto o aumento da presença de bio-resíduos ou de inertes diminui o referido poder calorífico. O poder calorífico dos resíduos incinerados represente um valor 7700kJ/kg em base tal e qual, com um teor de humidade de 45 a 50%. Conforme a Figura 4.4 os plásticos representam 13,1%, o papel/cartão representa 11,4% da composição dos resíduos. Os bio-resíduos (putrescíveis) representam 41,3%

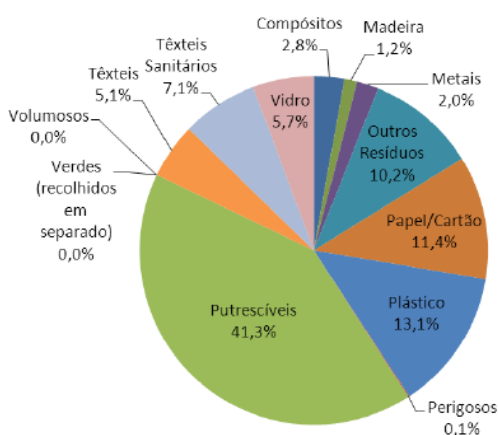


Figura 4.4 - Composição física média dos RSU. Dados da campanha de caracterização 2009 [Lipor, 2010].

4.1.4 A RECUPERAÇÃO DE ENERGIA NA LIPOR

Os consumos comparáveis por fonte de combustível da instalação de valorização energética da LIPOR, são evidenciados por anos na Tabela 4.2. Analisando o consumo de eletricidade da Unidade Operacional, podemos verificar: um aumento significativo de quase 35% ou $10,6 \times 10^4$ kWh no consumo de eletricidade da Central de Valorização Energética, face ao ano de 2011. Dado ao seu regime de funcionamento contínuo e em virtude de um menor número de horas de funcionamento da unidade, houve a necessidade de recorrer à aquisição de energia elétrica da rede nacional. Face ao ano 2010 em comparação com 2012 há uma diminuição em 45 % do consumo eletricidade importada. Também observa-se da tabela um aumento significativo do consumo de combustível (gasóleo) na Central de Valorização Energética, provocado por várias paragens da unidade que induziram um maior número de reativações dos geradores. Em

contrapartida releva-se uma diminuição do consumo de gás natural numa diminuição de 0,84% pela instalação.

Tabela 4.2 - Consumos internos de energia importada [RS,LIPOR, 2012].

Consumo de energia	Unidades	2010	2011	2012
Eletricidade	GJ	2700	1089	1469
Gasóleo	GJ	157,85	54,68	172,44
Gás natural	GJ	7014,27	4962,62	4920,96

4.2 UNIDADE DE INCINERAÇÃO DA LIPOR

A designada Central de Valorização Energética da LIPOR (CVEL) está situada na Maia, tem como o objetivo a valorização, na forma de energia elétrica, da fração de resíduos que não possa ser aproveitada através da compostagem e reciclagem. A CVEL tem uma capacidade de tratamento de 380000 toneladas de resíduos por ano, tratando em média, cerca de 1100 toneladas de resíduo por dia e produzindo cerca de 170000 MWh de energia elétrica por ano, dos quais cerca de 90 % são enviados à rede pública, permitindo abastecer um aglomerado populacional da ordem de 150 mil habitantes (LIPOR 2013).

4.2.1 RECEÇÃO DE RESÍDUOS

Os resíduos chegam à central de incineração LIPOR II Central provenientes dos vários circuitos de recolha de resíduos urbanos indiferenciados dos municípios que constituem a LIPOR e são armazenados numa fossa de receção com capacidade de 18000 m³ (6000 toneladas), ou seja, tem capacidade para seis dias de produção. A fossa encontra-se num edifício fechado e mantido em depressão (a pressão é menor dentro do edifício) para evitar a propagação de odores, sendo os resíduos posteriormente transferidos para as duas linhas de incineração, com capacidade para 24,4 t/h de resíduos cada uma. As linhas de tratamento funcionam em contínuo e de forma praticamente automática.

4.2.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

Os resíduos são transferidos da fossa de receção para as tremonhas de alimentação dos fornos através de uma ponte rolante provida de um pólo de garras, que também faz a

homogeneização dos resíduos na fossa. Os movimentos da ponte são assegurados a partir da sala de controlo. Uma vez na tremonha, os resíduos são progressivamente empurrados por um sistema de êmbolos hidráulicos para a grelha de combustão, onde são queimados a elevadas temperaturas (1000° C a 1200° C). Existem duas grelhas de incineração que operam em paralelo. As grelhas apresentam uma inclinação de 26° sobre a horizontal, o que favorece a queda dos resíduos por ação da gravidade.

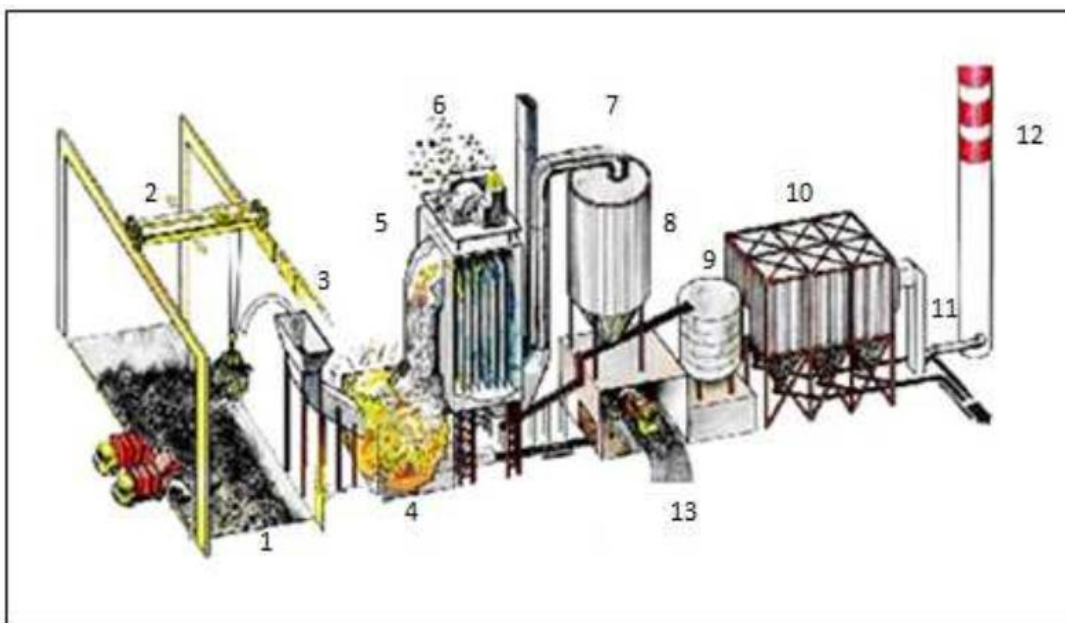


Figura 4.5 - Esquema da instalação de incineração de resíduos LIPOR [Adaptado Lipor, 2013].

1 – Fossa de receção; 2 – Ponte rolante com pólo de garras; 3 -Tremonha de alimentação do forno; 4 – Câmara de combustão; 5 – Caldeira; 6 – Alternador e turbina; 7 – Sistema de adição de carvão ativado; 8 – Reator; 9 – Silo das cinzas; 10 – Filtro de mangas; 11 -Ventilador de extração de gases; 12 – Chaminé; 13 – Fossa dos rejeitados.

4.2.3 GRELHA - PROCESSO DE COMBUSTÃO

Na LIPOR II os resíduos são incinerados na presença de ar à temperatura 1000 °C até 1200°C na presença de excesso de oxigénio. Deste processo de combustão são libertados gases a elevada temperatura que passam por uma caldeira de recuperação de energia, onde o seu calor é aproveitado para a produção de vapor de água sobreaquecido a elevada pressão.

A adição de ar de combustão aos resíduos ocorre em dois estágios, o ar primário é utilizado para a queima do resíduo, sendo introduzido na fornalha já pré-aquecido até

170 °C com vapor extraído da turbina sendo introduzido ao nível da grelha que suporta os resíduos; o segundo estágio corresponde à adição de ar secundário e é feita ao nível onde ocorre a combustão de voláteis, ou seja acima da massa sólida em combustão. Seguindo o procedimento indicado, a adição de ar por estágios reduz a turbulência ao nível dos resíduos e o consequente arrasto de sólidos com os gases de combustão.

As condições de operação da incineração na LIPOR II, disponibilizados no inquérito, são indicadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Condições de operação da incineração LIPOR.

Caudal mássico total de resíduos (ton/dia)	1100
Teor de humidade (%btq)	45-50
Caudal mássico de ar total (Nm ³ /h)	180000
Temperatura do ar primário (°C)	170
Temperatura de incineração dos gases (°C)	880
Repartição ar primário/ar secundário	3:1

4.2.4 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

A recuperação de energia no sistema de incineração da LIPOR é efetuado através do uso de um ciclo Rankine. Para o efeito o sistema dispõe de duas caldeiras, uma por cada grelha, cada uma operando com 16,38 kg/s de água saturada, previamente pré-aquecida até uma temperatura de 135 °C e 65 bar a partir de um tanque de homogeneização e nivelção. Ao passar através dos feixes tubulares da caldeira: (a) primeiro através do permutador de água-gás designado economizador, (b) depois mudando de fase líquida para vapor saturado no ebulidor (e barrilete) (c) e finalmente sobreaquecendo o vapor de água no designado sobreaquecedor. O caudal de vapor produzido nas caldeiras é de 32,16 kg/s sai á uma temperatura de 394 °C e uma pressão de 65 bar e em seguida vai ser sujeito a expansão na turbina produzindo trabalho de rotação de veio. Durante o processo de expansão na turbina são feitas 3 extrações de vapor, a 5 bar, a 3 bar e a 2 bar. O vapor na primeira extração após reaquecimento com a purga de vapor da caldeira, é utilizado para o aquecimento do caudal de ar primário do processo de incineração dos resíduos e o aquecimento da água fresca introduzida no sistema que se encontra estimada em 5 %. As restantes duas extrações são feitas para o aquecimento dos condensados. A descarga da última turbina ocorre em condições sub-atmosféricas de 0.2 bar absolutos para o sistema de condensação.

O sistema de condensação é composto de 6 aerocondensadores com arrefecimento por ar atmosférico com ventilação forçada, descarregando água líquida a 40°C. Cada aerocondensador é movimentado por um motor elétrico de 90 kW cada.

A água proveniente do sistema de condensação é em seguida bombeada a 1.5 bar e sujeita a aquecimento pelas extrações de vapor com origem na turbina, até atingir a temperatura de cerca de 100°C e depois novamente bombeada a 14 bar onde é aquecida a 135°C e depois sujeita a uma terceira compressão com uma bomba para envio à caldeira.

4.2.5 TRATAMENTO DE EFLUENTES GASOSOS

A LIPOR realiza um programa de monitorização interna para avaliar os níveis de emissão dos efluentes gasosos e, consequentemente, o seu desempenho ambiental. Como a LIPOR é uma unidade de incineração de resíduos urbanos, com produção de energia elétrica, a Licença Ambiental emitida pela Agência Portuguesa de Ambiente (APA) define de forma clara os parâmetros a medir e a sua periodicidade. A monitorização interna consiste no controlo dos poluentes, cujos VLE constam da licença ambiental partículas, HCl, HF, SO₂, NO_x, NH₃, CO, metais pesados, PCDD/PCDF - tendo por base o Decreto-Lei nº 85/2005. Antes da entrada em vigor do Decreto-Lei nº 85/2005 os VLE para estes poluentes eram definidos pela Diretiva Europeia nº 89/369/CEE (que mais tarde foi revogada pela Diretiva nº 2000/76/CE, que foi transposta pelo DL nº 85/2005) e consideravam-se cumpridos se as concentrações médias diárias não excedessem em mais de 30% os limites legais (regime de tolerância).

Os metais pesados, as dioxinas e furanos são monitorizados pontualmente, ou seja, a sua medição é apenas efetuada algumas vezes por ano, pois ainda não existe tecnologia para a sua monitorização em contínuo, enquanto os restantes poluentes são monitorizados em contínuo controlo. O sistema de tratamento de gases é constituído por dois reatores, dois filtros de mangas e a chaminé. No entanto, é no momento da combustão dos resíduos que se inicia o tratamento dos gases produzidos. Numa primeira fase, os gases libertados permanecem na câmara de combustão pelo menos durante dois segundos a uma temperatura superior a 850°C, assegurada, se necessário, pelo sistema de queimadores auxiliares alimentados a gás natural (tal como consta no artigo 20º e no artigo 21º do DL nº 85/2005, de 28 de Abril).

Os valores de emissão dos poluentes monitorizados, para os últimos três anos, encontram-se discriminados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Valores de emissão de poluentes monitorizados na LIPOR [Lipor, 2013].

Quantidade emitida (kg/ano)	2010	2011	2012
HCl	6,546	6,269	7,253
NO _x	273,483	280,348	272,317
HF	466	280	148
SO ₂	8,831	10,675	9,166
Partículas	1,778	1,551	1,269
CO	15,615	12,364	11,833
PCDD/PCDF	0,000010	0,000004	0,000004

Uma correta combustão nesta fase permite a remoção das dioxinas e dos furanos, sendo uma parte posteriormente removida ao nível dos reatores. É ainda nesta fase que é injetada ureia, na forma de solução aquosa, com o objetivo de minimizar as emissões de NO_x (a solução de ureia é comprada já preparada, sendo armazenada num tanque). A ureia funciona como agente redutor (também se poderia utilizar amoníaco). Os óxidos de azoto nos gases de combustão são reduzidos a azoto (N₂) e vapor de água pelo agente redutor. As reações ocorrem a temperaturas entre 850°C e 1000°C, sendo a gama ótima entre 900°C e 920°C (IPPC, BREF, (2006); Lipor, (2013)).

Os gases são submetidos a um tratamento do tipo semi-húmido, no reator. São adicionados carvão ativado e uma suspensão de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) no cimo do reator, doseados por atomização (*spray*), misturando-se com o fluxo gasoso a tratar (ver Figura 4.6 a). O calor dos gases permite a evaporação do solvente (água), que condensa nas paredes do reator (IPPC, BREF, 2006). Os produtos da reação apresentam-se na forma seca (cinzas), sendo removidos no fundo do reator e armazenados num silo. Algumas partículas sólidas ainda continuam no fluxo gasoso, sendo removidas posteriormente no filtro de mangas. Um dos reatores da central pode ser visto na Figura 4.6 b).

Para controlar o nível de concentração de óxidos de azoto o efluente gasoso é sujeito ainda a um processo de redução catalítica seletiva (SCR) com amónia. O controlo final de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH) e mercúrio é realizado com carvão ativado, antecedendo a ventilação para a atmosfera através de chaminé.

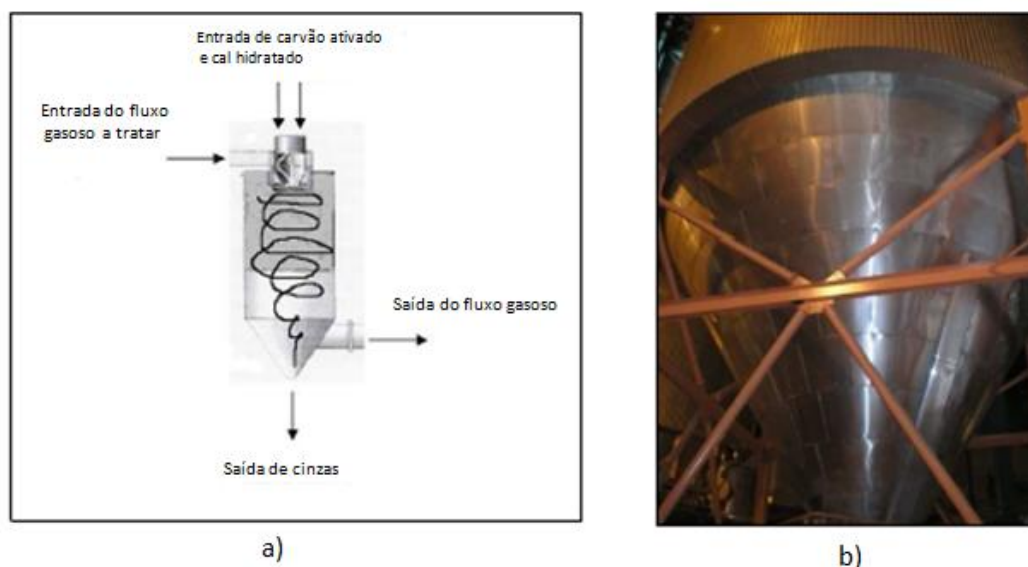


Figura 4.6 - a) Esquema de funcionamento reator [Fonte: IPPC,BREF 2006] e b) Reator da Central Lipor II [Fonte: Lipor, 2013].

As cinzas, devidamente inertizadas, são enviadas para o aterro sanitário de apoio, e depositadas num alvéolo específico, especialmente concebido para o efeito (Cardoso L., 2010).

De acordo com as conclusões de Cardoso L., (2010), no que respeita à monitorização das emissões e desempenho ambiental da Lipor, estudo efetuado na própria empresa, a eficiência do sistema de tratamento de gases é muito elevada, apresentando valores muito próximos de 100%, permitindo assim concluir que os poluentes do processo de incineração são corretamente tratados e controlados. Os fatores de emissão estimados para os poluentes emitidos pela central de incineração são semelhantes ou inferiores aos fatores de emissão encontrados em diversas instalações que foram objecto de publicação, o que permite concluir que Central de Valorização Energética da Lipor opera em condições de segurança.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O objetivo principal da tese é o de avaliar cenários de gestão de resíduos urbanos através da incineração com recuperação de energia mecânica e/ou térmica, que permitam que a incineração possa ser considerada como uma operação de valorização de resíduos urbanos. Para este efeito foi considerado o caso de estudo da LIPOR, tendo sido realizada uma recolha de informação de suporte à realização do balanço mássico e energético e ao ensaio do ciclo de Rankine em condições concretas de operação em estado estacionário. A partir destas condições foi inferida a eficiência de recuperação de energia de acordo com a fórmula R1. Desde já se salvaguarda que o caso de estudo considerado (LIPOR) tem apenas o interesse académico de servir de suporte em relação a alguma informação, já que não foi possível conhecer com o necessário detalhe todo o caso de estudo. Por outro lado as ferramentas de estudo/análise disponíveis poderão não ser as mais indicadas, pois servirão apenas para avaliar o sistema em termos gerais e aproximados o que significa que os valores indicados no caso de estudo são apenas isso mesmo.

Refira-se que em algumas situações e na ausência de informação específica, foi deliberada unilateralmente alguma informação e/ou processo. Em qualquer caso procurou-se balizar os cálculos efetuados com a informação disponível.

5.1 RECOLHA DE INFORMAÇÃO

O procedimento de recolha de informação relativamente ao processo de incineração e em particular o processo de recuperação de energia foi efetuado por pesquisa na internet e por entrevista direta aos agentes responsáveis pela exploração da instalação: a Port' ambiente enquanto entidade exploradora e a LIPOR enquanto entidade fiscalizadora. Para o efeito foi preparado uma tabela de inquérito que foi apresentada previamente e depois preenchida em reunião conjunta dos referidos agentes com a autora e o supervisor deste trabalho.

Alguns dos valores solicitados não eram conhecidos (ou não puderam ser divulgados publicamente).

Os referidos valores foram sendo referidos ao longo do trabalho, mas são particularizados nas secções seguintes.

Um aspeto do quadro sinóptico da instalação é dado no Anexo B que infelizmente não detalha os vários componentes do ciclo de Rankine de recuperação de energia.

O dado chave mais importante para o efeito da análise do processo é a capacidade diária de incineração da instalação que está fixada nominalmente em 1100 ton/dia repartida por duas linhas de incineração em paralelo, ou seja duas caldeiras. Ao contrário do processo de incineração, o restante processo de recuperação de energia (ciclo de vapor) ocorre sobre um única linha.

5.2 BALANÇO MÁSSICO

5.2.1 COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS A INCINERAR

A composição dos reagentes é fundamental para conhecer a composição dos produtos de incineração e a quantidade de energia que apresenta. Convém desde já esclarecer que o exercício do balanço mássico foi efetuado em base seca ou seja por kg de R.

Tendo em conta a composição em componentes do resíduo urbano a incinerar então pode estimar-se a composição próxima, elementar e poder calorífico da mistura a incinerar (ver Tabela 5.1). A composição próxima, elementar e poder calorífico de cada componente dos resíduos encontra-se tipificada na literatura (ver Tchobanoglous *et.al.*,1996).

Neste âmbito importa referir que o teor de humidade é sem dúvida o dado analítico que apresenta maior variabilidade ao longo do ano. No âmbito dos cálculos efetuados concluiu-se que a presença de humidade condiciona fortemente a necessidade do uso de combustível auxiliar. Realmente o conteúdo em humidade que a LIPOR indica para os resíduos que incinera é de cerca de 50%, a que corresponde uma razão mássica de humidade de 1kg H₂O/kg de R que foi o valor efetivamente usado no cálculo subsequente (e não o valor de 0,4734 que é indicado na Tabela 5.1).

Por outro lado, assumiu-se que a incineração é realizada na presença de gás natural que funciona como combustível auxiliar para manter as condições de exploração durante as fases de arranque e de paragem. Contudo considerou-se ainda o uso de gás natural para assegurar as condições de serviço necessárias para manter as condições de exploração, nomeadamente ao nível da potência térmica da caldeira com vista a assegurar o regular funcionamento da turbina e a eventual satisfação do contrato de fornecimento de energia elétrica à rede (ver a composição e o poder calorífico Tabela 5.2, calculados com base na

composição do gás natural indicada em Matos, M.A.A. 2011). A informação disponível no site da LIPOR indica que também é usado gasóleo no pré-aquecimento do incinerador.

Ocasionalmente é ainda admitido vapor de alta pressão para fazer a sopragem (limpeza) das superfícies de permuta.

Tabela 5.1 - Composição próxima e elementar da mistura de resíduos R (base seca).

Teor de humidade	Composição elementar (fracção mássica)						Poder Calorífico Inferior
Razão mássica	carbono	hidrogénio	oxigénio	azoto	enxofre	cinzas	
W_{WR}	W_{CR}	W_{HR}	W_{OR}	W_{NR}	W_{SR}	W_{ZR}	PCI_R
(kg H ₂ O/kg R bs)	(kg C/kg R bs)	(kg H/kg i bs)	(kg O/kg i bs)	(kg N/kg i bs)	(kg S/kg i bs)	(kg Z/kg R bs)	(MJ/kg R bs)
0,473405039	0,362033741	0,046163843	0,243660822	0,010661559	0,001456903	0,336023132	12,55

Tabela 5.2 - Composição próxima e elementar da mistura de gás natural (base seca).

Teor de humidade	Composição elementar (fracção mássica)						Poder Calorífico Inferior
Razão mássica	carbono	hidrogénio	oxigénio	azoto	enxofre	cinzas	
W_{WF}	W_{CF}	W_{HF}	W_{OF}	W_{NF}	W_{SF}	W_{ZF}	PCI_F
(kg H ₂ O/kg F bs)	(kg C/kg F bs)	(kg H/kg F bs)	(kg O/kg F bs)	(kg N/kg F bs)	(kg S/kg F bs)	(kg Z/kg F bs)	(MJ/kg F bs)
0,000	0,697	0,216	0,003	0,084	0,000	0,000	45,088

Nestas condições a necessidade estequiométrica de oxigénio do resíduo em incineração é de $W_S = 1.0925 \text{ kg O}_2/\text{kgR}$. Para o gás natural as necessidades estequiométricas de oxigénio são $W_S = 3.5851 \text{ kg O}_2/\text{kgF}$.

5.2.2 COMPOSIÇÃO DOS PRODUTOS DE INCINERAÇÃO

A composição média aproximada dos produtos de combustão na instalação pode ser prevista se conhecer o excesso de ar ou a razão de equivalência, contudo não são parâmetros operacionais diretos. De um modo geral o excesso de ar ou a razão de equivalência são inferidos por tentativa, comparando a composição dos produtos de combustão calculados e com a composição observada: (ver Tabela 5.4).

Tendo em conta a composição dos reagentes, constituída por ar de combustão, resíduos urbanos, gás natural e vapor de sopragem e um conjunto de considerações que adiante se especificam, foi possível determinar a composição dos produtos gasosos da instalação, que se apresenta na Tabela 5.4.

Tabela 5.3 - Composição dos gases de combustão na instalação (inquérito).

Gás	Composição	Unidades
CO ₂	0,090	kmol CO ₂ /kmol M (gases secos)
O ₂	0,090	kmol O ₂ /kmol M (gases secos)
H ₂ O*	0,250	kmol H ₂ O/kmol M (gases secos)
NO ₂	180	mg NO ₂ /Nm ³
CO	10	mg CO/Nm ³
SO ₂	10	mg SO ₂ /Nm ³
Partículas	3	mg partículas /Nm ³
COT mg/Nm ³	1	mg COT/Nm ³

Procurando ir ao encontro dos valores observados (ver Tabela 5.3) foi possível concluir que a incineração de resíduos na LIPOR ocorre com excesso de ar de cerca de 75%, o que corresponde a uma utilização de cerca de 8,24 kg ar seco/kg R.

Tabela 5.4 - Composição calculada dos gases de combustão.

gas i	kg i/kg R bs	kmol i/kg R bs	kmol i/ kmol gases secos	kmol i/ kmol gases humidos
CO ₂	1,2652	0,0288	0,1055	0,0809
H ₂ O	1,0537	0,0585	0,3047	0,2335
SO ₂	0,0029	4,553E-05	0,00013	0,00010
O ₂	0,8647	0,0270	0,0789	0,0604
N ₂	6,2244	0,2223	0,8050	0,6170
Ar	0,1135	0,0028	0,0102	0,0078

Nota: No caso do consumo de 76 ton / dia de gás natural não é só para manter a combustão, mas também para obter a potência de 82,88 MWth na caldeira, e a incineração de 1100ton/dia para um teor de humidade de 50 % btq.

Nas condições atrás referidas, a composição em produtos sólidos (admitindo que 5% dos resíduos da incineração (escórias e volantes) são inqueimados e cerca de 7,5% dos resíduos são volantes) é possível calcular em cerca de 0,326 kg escórias/kg R e 0,026 kg de volantes/kg R.

5.2.3 CAUDAIS MÁSSICOS

Tendo em conta o balanço mássico unitário e a quantidade de resíduo incinerado para cada linha (550 ton RU tal e qual /dia), calcula-se que o caudal de ar seja de cerca 53,5 kg ar húmido/s). Por outro lado o caudal de ar de combustão do combustível auxiliar (considerado como gás natural) é de 14,5 kg/s (para um caudal gás natural de 0,88 kg/s).

Estes valores comparam favoravelmente do com a informação disponibilizada, em que o caudal de ar corresponde a 64kg/s (sendo que o caudal de ar primário é de 70000Nm³/dia e o caudal de ar secundário é de 20000 Nm³/dia)

5.3 BALANÇO ENERGÉTICO

5.3.1 ENERGIA E POTÊNCIA TÉRMICAS DISPONÍVEIS

Uma vez concluído o balanço mássico em torno da caldeira, torna-se possível determinar o respectivo balanço energético. Tendo em conta o presente caso de estudo e para determinar o balanço energético é necessário conhecer (inquérito ou sinóptico)

- (a) a temperatura dos gases à saída do economizador (valor indicado de 238°C),
- (b) a temperatura de entrada do ar de combustão dos resíduos (valor indicado de 170°C).

Contudo há ainda necessidade de mais especificações, que não são acessíveis diretamente ou que são desconhecidos ou que apresentam grande incerteza ou exigem grande esforço de cálculo, e que por estas razões nos limitamos a pressupor (especificar ou arbitrar) com base em casos típicos, desde que o impacto no cálculo do balanço energético seja limitado (até 5%, por exemplo) (a) a temperatura arbitrada de 477°C à saída das escórias (b) e assumir todo o ar de combustão dos resíduos é pré-aquecido embora as evidências apontem para que o pré-aquecimento incida apenas no ar primário (a admissão de ar na caldeira encontra-se repartida entre ar primário através das grelhas, ar secundário introduzido na zona de pós-combustão acima da chama e ar terciário introduzido para proteção ao sobreaquecedor) (c) a temperatura do ar de combustão do combustível auxiliar e temperatura do combustível auxiliar (valor arbitrado 25°C).

Foi ainda assumido como pressuposto, que a energia perdida pela envolvente corresponde no máximo a cerca de 5% da energia dos reagentes. A energia perdida contempla o calor transferido através das paredes e dissipada na superfície externa sob a forma de calor de convecção e radiação. O valor no cálculo das perdas energéticas foi

considerado arbitrário, sendo que depende da forma do incinerador do estado de conservação e do tipo de isolamento térmico, etc.

Nestas condições pode concluir-se que a energia útil ou disponível a partir dos resíduos é de 7,8 MJ/kg R e de 38,6 MJ/kg F.

Tendo em conta que o caudal de resíduos (base tal e qual) a tratar é de 550 ton /dia, para cada linha de incineração, a que corresponde 12,73 kg/s de resíduo urbano húmido (50% de humidade), a potência térmica disponibilizada pela incineração de resíduos é assim de 48,5MWth.

O caudal de combustível auxiliar necessário está dependente assim da potência térmica que é necessário transmitir ao fluido do ciclo Rankine pela caldeira e obviamente da potência térmica disponibilizada pela combustão dos resíduos.

A análise das condições operatórias do ciclo de Rankine, tendo em conta a informação disponibilizada no inquérito aponta para um caudal de vapor/ água no ciclo de 32,16 kg/s (110 ton/h), embora o sinóptico (ver Anexo B) apresenta 59 ton/h, para uma só linha.

Por outro lado o inquérito aponta para uma potência mecânica útil (eletricidade) introduzida na rede elétrica de 22,5 MWe. Por outro lado o sinóptico apresenta um valor da potência da turbina de 24,39 MWe. Neste âmbito importa indicar os consumos de energia mecânica (eletricidade) das bombas (230kW) e dos aerocondensadores (90kW × 6=540 kW) obtidos por inquérito.

Tendo sido referido que a água de alimentação à caldeira se encontra a 14 bar e a 135°C e sai daquela a 394°C e a 65 bar, conclui-se a partir da diferença de entalpia da água/vapor entre a entrada e a saída e do caudal de fluido que a potência térmica disponível é de 82,88 MWth, Nestas circunstâncias, conclui-se que o caudal de combustível auxiliar (gás natural) é de 0,88kg/s (ou seja 76 ton/dia).

No Anexo C pode encontrar-se um quadro com o exercício do balanço mássico e energético para várias condições de humidade dos resíduos.

5.3.2 TEMPERATURA MÁXIMA DE COMBUSTÃO

A temperatura adiabática de chama ($T_{\text{adiabática}}$) decorre do exercício do balanço energético e respeita à temperatura a que ficariam os gases produtos da combustão se a totalidade da energia libertada pela combustão fosse incorporada nestes. No presente caso, o exercício foi efetuado à combustão dos resíduos mas mantendo 5% de perdas, pelo que

poderá ser designado como temperatura máxima de combustão (T_{\max}). Nas referidas condições a simulação do balanço mássico permitiu concluir que, para teores de humidade dos resíduos superiores a 50% (em base tal e qual), a temperatura máxima de combustão já é inferior a 1000°C pelo que nestas condições, torna-se necessário adicionar combustível auxiliar (gasóleo ou gás natural) para manter a temperatura de combustão entre 1000-1100 °C geralmente considerada necessária para a combustão de resíduos (ver Figura 5.1).

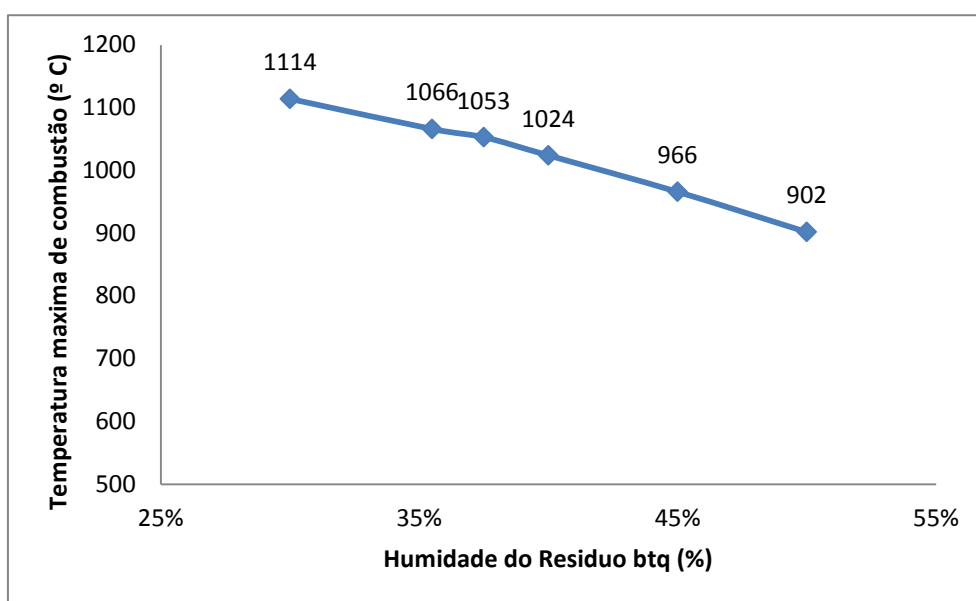


Figura 5.1 - Temperatura máxima de combustão em função da humidade do resíduo para um $PCI=12,54\text{MJ/kg}$

Desta forma as necessidades de combustível auxiliar para manter a combustão dos resíduos e a produção de potência útil de 82,9 MWth. Como se apresenta na Figura 5.2 as necessidades de combustível auxiliar da incineração diminuem com o aumento do poder calorífico dos resíduos e com a diminuição da humidade.

Contudo o aumento do PCI e a diminuição do teor de humidade dos resíduos fazem aumentar também a temperatura máxima de combustão, o que pode ocasionar a ocorrência de fusão de cinzas; nestas circunstâncias a grelha deve estar especialmente preparada para o referido efeito, pois em caso contrário podem subsistir problemas graves de operação.

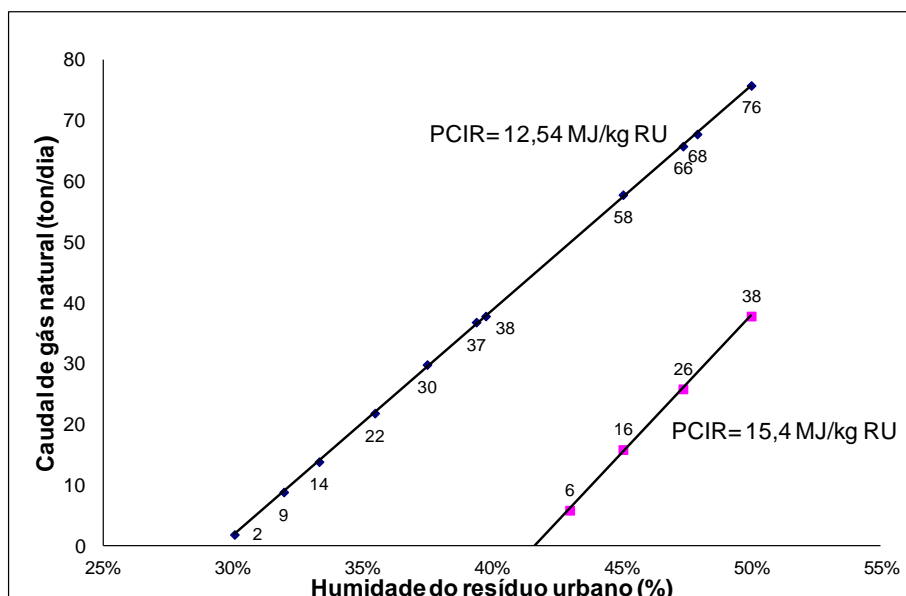


Figura 5.2 - Necessidade de gás natural em função do teor de humidade e do poder calorífico do resíduo.

5.4 ANÁLISE DO SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

Vimos que a aplicação CyclePad permite modelizar o ciclo Rankine e partir do que se espera poder calcular as quantidades de energia (calor e trabalho) em trânsito.

O ensaio da aplicação CyclePad ao caso de estudo, permitiu obter um modelo do ciclo Rankine com algum detalhe. Durante o ensaio do modelo de ciclo foi possível constatar algumas insuficiências da informação disponível que serviram para ensaiar diferentes alternativas e pressupostos. Infelizmente o desenvolvimento de maior detalhe foi condicionado por limitações da própria aplicação CyclePad em relação à adição de mais componentes. Verificou-se ainda pelo menos uma incongruência nos resultados do modelo.

5.4.1 CICLO RANKINE

A modelação feita com o software CyclePad, apresenta-se na Figura 5.3. Inclui quatro estágios de expansão de vapor em turbina (tem três extrações), três estágios de compressão de líquido em bomba, um estágio de condensação, um estágio de aquecimento em caldeira, três permutadores de calor (reaquecimento de vapor, aquecimento de ar, aquecimento de condensados), várias laminagens, splittings e pontos de mistura.

Durante o funcionamento do ciclo, cerca de 5% do caudal de vapor é retirado (a seguir à caldeira) como purgas e sopragem. Admitiu-se que as purgas são direcionadas ao reaquecimento da primeira extração, o que se afigura essencial ao aquecimento do ar de combustão à temperatura imposta de 170°C.

Para além de trabalho mecânico obtido por expansão de vapor na turbina, regista-se que as diferentes extrações de vapor a baixa pressão tinham por objetivo proceder ao aquecimento dos condensados de alimentação à caldeira, reproduzindo-se em termos de modelo a informação que foi recolhida junto da LIPOR. Não foi executado qualquer exercício de avaliação do processo na óptica da otimização do processo de aproveitamento de energia. A Figura 5.3 apresente o ciclo construído com a aplicação CyclePad.

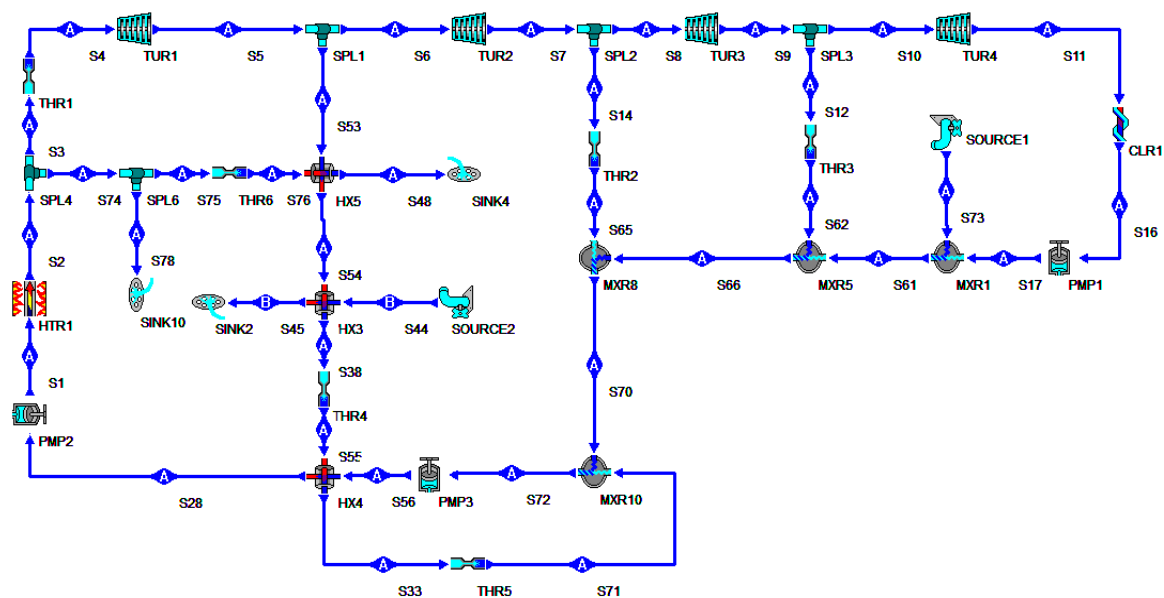


Figura 5.3 - Esquema do modelo ciclo de Rankine realizado com a aplicação Cyclepad.

5.4.2 PRESSUPOSTOS

Os pressupostos assumidos no modelo visam assegurar um conjunto de condições de base para uma modelização bem-sucedida. Alguns destes pressupostos poderão ser revistos no sentido de aperfeiçoar o modelo, (ver Figura 5.4) No presente caso foram assumidos os seguintes pressupostos:

- as turbinas e as bombas foram assumidas como isentrópicas;
- o condensador opera isobaricamente;

- a caldeira não opera isobaricamente de acordo com a informação fornecida; sendo que a bomba fornece água bombeada á uma pressão de 65 bar, enquanto na saída da caldeira verifica-se uma diminuição da pressão até 43 bar.

- os permutadores operam de forma não isobárica no caso de gases ou vapores e de forma isobárica no caso de líquido.

Na construção do modelo foi assumido um processo de reaquecimento de vapor extraído da turbina para o aquecimento do ar primário, pois nas condições de extração (5 bar absolutos) a temperatura de vapor é inferior à temperatura de aquecimento necessária (170°C).

Foi também assumido a necessidade de existirem bombas e tanques de condensados para mistura/reaquecimento com vapor ou condensados, organizados em série durante o processo de reaquecimento de condensados, atendendo às pressões de extração indicadas (5, 3 e 2 bar respetivamente)

As condições de pressão e temperatura que antecedem a bombagem para a caldeira foram indicadas pela LIPOR: 14 bar a 135°C.

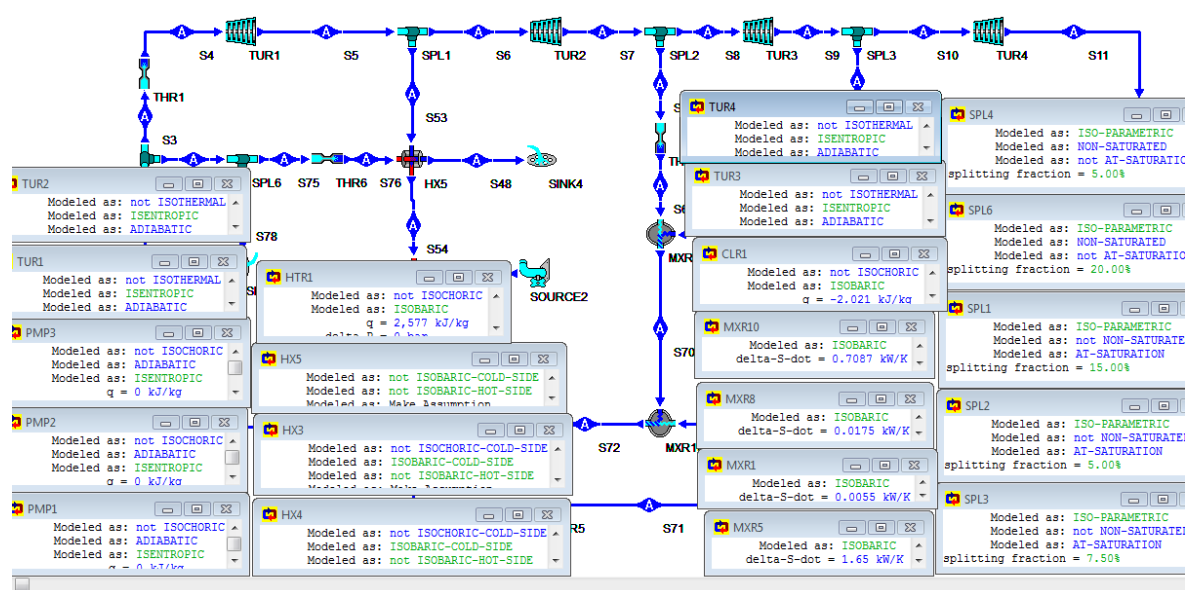


Figura 5.4 – Condições de funcionamento dos diferentes componentes do ciclo

Foi necessário assumir uma pressão intermédia nas linhas de condensados de 1,5 bar, pois recebe os condensados e procede ao seu aquecimento a partir das extrações indicadas de 2 e 3 bar até uma temperatura limite de cerca de 110°C (valor assumido). Admitiu-se ainda a presença de válvulas de laminagem para (redução de pressão)

durante a descarga de vapor (eventualmente saturado) a partir da turbina destinada ao reaquecimento dos condensados nos diversos tanques.

5.4.3 VARIÁVEIS PRINCIPAIS DO PROCESSO

As variáveis principais do processo respeitam às condições de operação dos diferentes órgãos. Estas condições foram indicadas para a instalação pelos operadores (por entrevista).

Assim na Figura 5.5 é possível visualizar as condições assumidas (a verde) para o exercício de cálculo das propriedades do fluido em todos os pontos do ciclo.

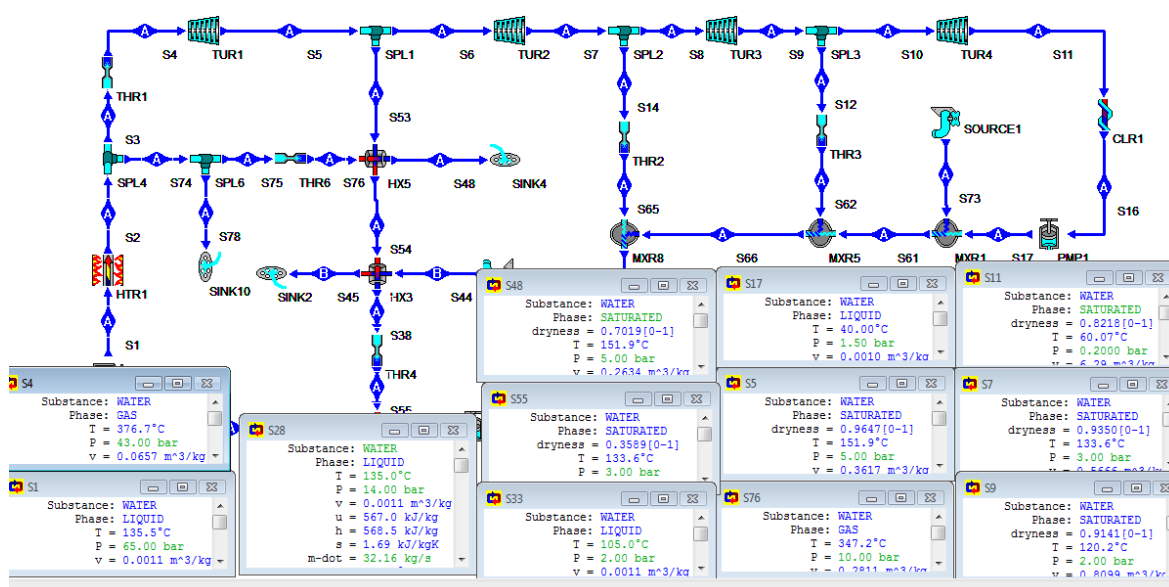


Figura 5.5 – Condições conhecidas e assumidas das principais variáveis do fluido operante (água/ vapor)

Contudo verificou-se algumas inconsistências na informação disponibilizada ou faltas de informação que foram resolvidas por um processo de tentativa-erro através do ensaio do modelo e que possibilitaram a solução completa, tendo em conta os pressupostos apresentados nas secções anteriores.

A água entra na caldeira em S1 a uma pressão de 65 bar e uma temperatura de 135°C, como líquido saturado. À saída da caldeira foi indicado que sai vapor sobreaquecido a 65 bar e à temperatura de 394 °C.

A expansão do vapor na turbina produz trabalho mecânico; portanto é feita a primeira extração a 5 bar do que resulta uma temperatura isentrópica de 151,9 °C, foi assumido para a primeira extração 15% do caudal mássico de vapor total, que corresponde a 4,58 kg/s para o pré-aquecimento do ar primário para o processo de incineração. O vapor extraído é reaquecido aproveitando o calor sensível do vapor extraído na purga da caldeira. Em seguida o vapor passa por um permutador de calor, aquecendo o caudal de ar primário (51,20 kg/s) da combustão dos resíduos de 25 °C até uma temperatura de 170 °C (ver Figura 5.6).

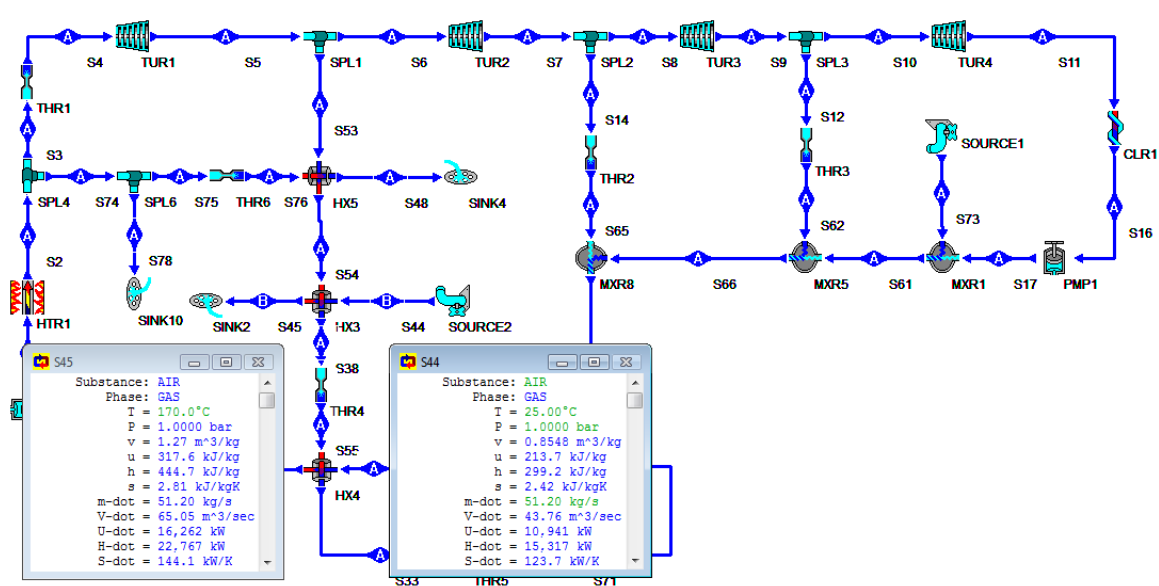


Figura 5.6 - Condições conhecidas e assumidas para o fluido operante Ar (Aquecimento do ar primário).

A segunda extração é feita a uma pressão de 3 bar absoluto à temperatura isentrópica de 133,6 °C tendo sido assumido 5% do caudal de vapor, o que corresponde a 1,30 kg/s de vapor. A terceira extração é feita a uma pressão de 2 bar absoluto e uma temperatura isentrópica de 120,2 °C, com um caudal assumido de 7,5 % correspondendo a 1,85 kg/s de vapor. Após a última expansão isentrópica na turbina, o vapor apresenta-se na condição sub-atmosférica a 0,2 bar absolutos e a uma temperatura isentrópica de 60,07 °C, na forma de vapor saturado com o título 0,82 de vapor.

5.4.4 RESULTADOS

Os resultados do modelo do ciclo Rankine permitem calcular os fluxos de material e de energia associados ao respetivo funcionamento.

5.4.4.1 TURBINAS

As equações de cálculo da energia produzida pela turbina entre dois estágios de expansão é dada no caso isentrópico por:

$$\dot{W}_{Ts} = \dot{m}(h_{2s} - h_1) \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Ou no caso não isentrópico por

$$\dot{W}_T = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Os resultados da modelização mostraram que a expansão ocorre com condensação, conforme se constata nas diferentes extrações.

A turbina admite 32,16 kg/s de vapor gerando 26,00 MW de potência mecânica. Parte desta potência mecânica é consumida para acionar as bombas (230kW) e para acionar os, aerocondensadores (540kW). Outros consumos internos e dissipações certamente ocorrem para serem entregues à rede elétrica apenas 22,5MW na forma de energia elétrica, (ver Figura 5.7).

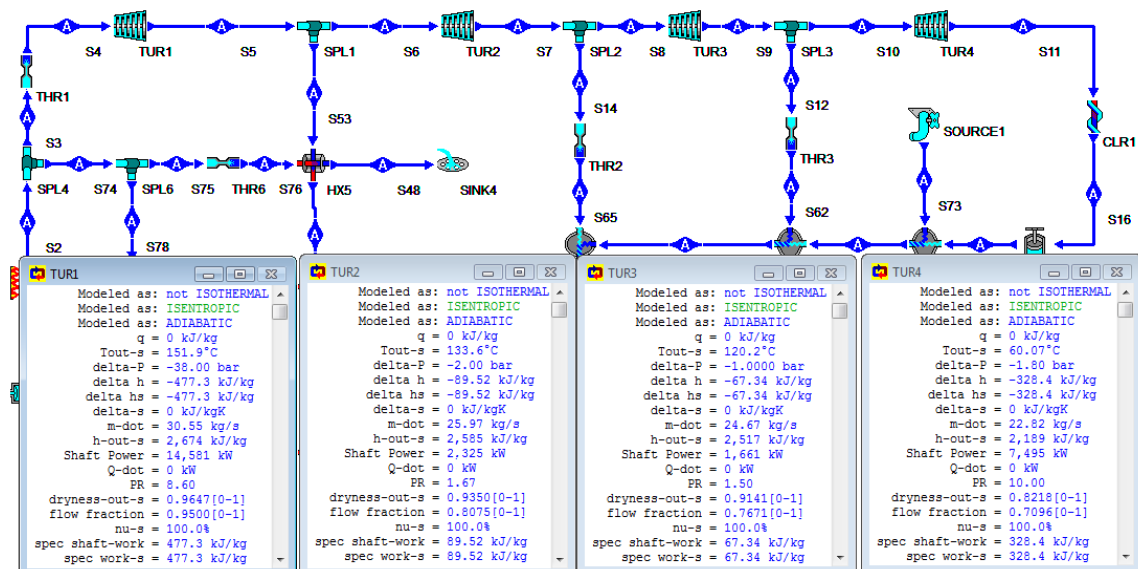


Figura 5.7 - Parâmetros de funcionamento das turbinas

O cálculo da potência gerada pela turbina durante os sucessivos estágios da expansão isentrópica é dado para a turbina TUR1, por:

$$\dot{W}_{T1} = \dot{m}(h_4 - h_5) = 30,55 \text{ kg/s} (3151 \text{ kJ/kg} - 2674 \text{ kJ/kg}) = 14,57 \text{ MW}$$

Para TUR2:

$$\dot{W}_{T2} = \dot{m}(h_6 - h_7) = 25,97 \text{ kg/s} (2674 \text{ kJ/kg} - 2585 \text{ kJ/kg}) = 2,31 \text{ MW}$$

Para TUR 3:

$$\dot{W}_{T3} = \dot{m}(h_8 - h_9) = 24,67 \text{ kg/s} (2585 \text{ kJ/kg} - 2517 \text{ kJ/kg}) = 1,68 \text{ MW}$$

Para TUR 4:

$$\dot{W}_{T4} = \dot{m}(h_{10} - h_{11}) = 22,82 \text{ kg/s} (2517 \text{ kJ/kg} - 2189 \text{ kJ/kg}) = 7,48 \text{ MW}$$

A potência total da turbina é dada pelo somatório:

$$\sum \dot{W}_T = 14,57 \text{ MW} + 2,31 \text{ MW} + 1,68 \text{ MW} + 7,48 \text{ MW} = 26,04 \text{ MW} .$$

Este valor calculado através da aplicação CyclePad está em concordância com os dados adquiridos no inquérito que apontam para uma potência mecânica útil da turbina de cerca de 26 MW (ver Anexo A), para um caudal de vapor dado de 32,16 kg/s (equivalente a 110ton/h, conforme sinóptico do Anexo B).

5.4.4.2 BOMBAS

A equação de cálculo da energia consumida por cada bomba do circuito é dada, no caso isentrópico, por

$$\dot{W}_{Bs} = \dot{m}(h_{2s} - h_1) = \dot{m} \nu (P_2 - P_1) \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Ou para o caso não isentrópico, por:

$$\dot{W}_B = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m} [c(T_2 - T_1) + \nu(P_2 - P_1)] \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Onde $c = 4183 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

No caso isentrópico, as bombas consomem uma potência de:

Para PMP1

$$\dot{W}_{B1} = \dot{m} v (P_{17} - P_{16}) = 22,82 \text{ kg/s} \times 0,0010 \text{ m}^3 / \text{kg} \times (1,5 - 0,2) \times 10^5 \text{ Pa} = 2,96 \text{ kW}$$

Para PMP2

$$\dot{W}_{B2} = \dot{m} v (P_1 - P_{28}) = 32,16 \text{ kg/s} \times 0,0011 \text{ m}^3 / \text{kg} \times (65 - 14) \times 10^5 \text{ Pa} = 180,42 \text{ kW}$$

Para PMP3

$$\dot{W}_{B3} = \dot{m} v (P_{56} - P_{72}) = 32,16 \text{ kg/s} \times 0,0010 \text{ m}^3 / \text{kg} \times (14 - 1,5) \times 10^5 \text{ Pa} = 40,2 \text{ kW}$$

O somatório da energia consumida pelas bombas é de

$$\sum \dot{W}_{B1} + \dot{W}_{B2} + \dot{W}_{B3} = 2,96 \text{ kW} + 180,42 \text{ kW} + 40,22 \text{ kW} = 223 \text{ kW}$$

Tabela 5.5 - Potência das bombas.

	Cálculo Cyclepad (Shaft Power (kW))	Verificação Eq.5.3. (Shaft power (kW))
PMP1	2,99	2,96
PMP2	176,3	180,2
PMP3	143,1	40,2
Total	322	223

O consumo de energia mecânica das várias bombas partir dos cálculos efetuados pelo software Cyclepad, aponta para um consumo de cerca de 320 kW de trabalho mecânico. Contudo a informação disponibilizada pelo inquérito ao valor da potência das bombas apresenta um valor de 230 kW. Tendo em conta a Eq.5.3 verifica-se que o software CyclePad apresenta uma inconsistência na bomba PMP3 pois embora indique o consumo de 143,1 kW (ver Figura 5.8), deveria apresentar cerca de 40kW, a avaliar pela energia de pressão que a água líquida consome nas referidas condições (ver Tabela 5.5).

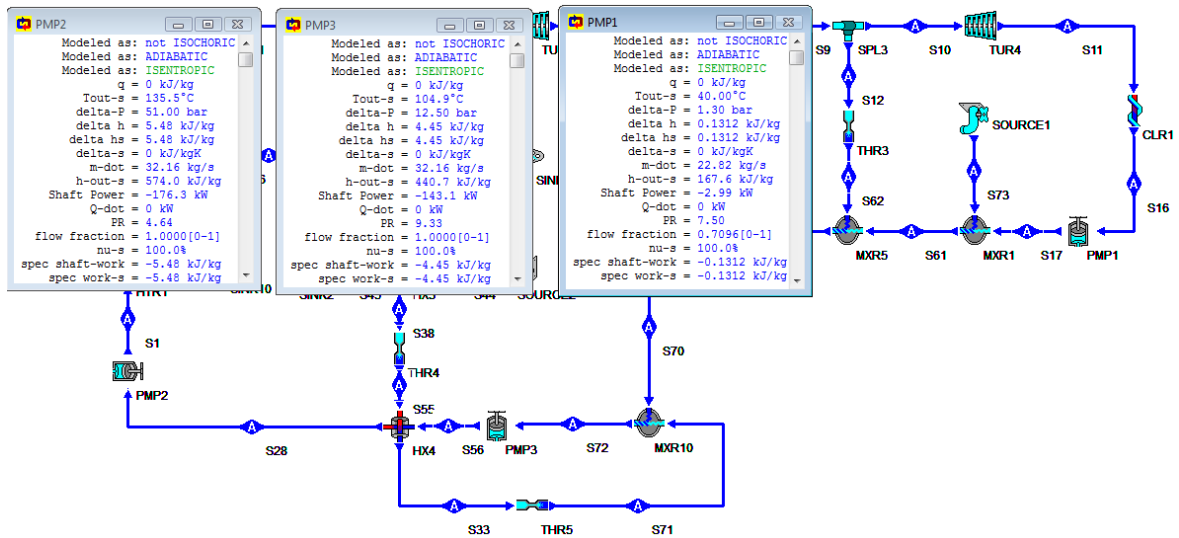


Figura 5.8 - Condições de operação das bombas

5.4.4.3 CALDEIRA

A caldeira faz uma recuperação de energia dos gases de combustão. Conforme os cálculos através da Cyclepad, a energia disponível na caldeira é de 82,88 MW, produzindo 32,16 kg/s de vapor sobreaquecido, (ver Figura 5.9)

A potência calorífica disponível na caldeira calculada através da equação do balanço energético á caldeira:

$$\dot{Q}_{adm} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (\text{Eq. 5.5})$$

$$\dot{Q}_{adm} = 32,16 \text{ kg/s} (3151 \text{ kJ/kg} - 574 \text{ kJ/kg}) = 82,88 \text{ MW}$$

O valor calculado coincide aproximadamente com o balanço energético calculado através do Excel, onde a potência térmica disponível na caldeira é de 82,88 MWth

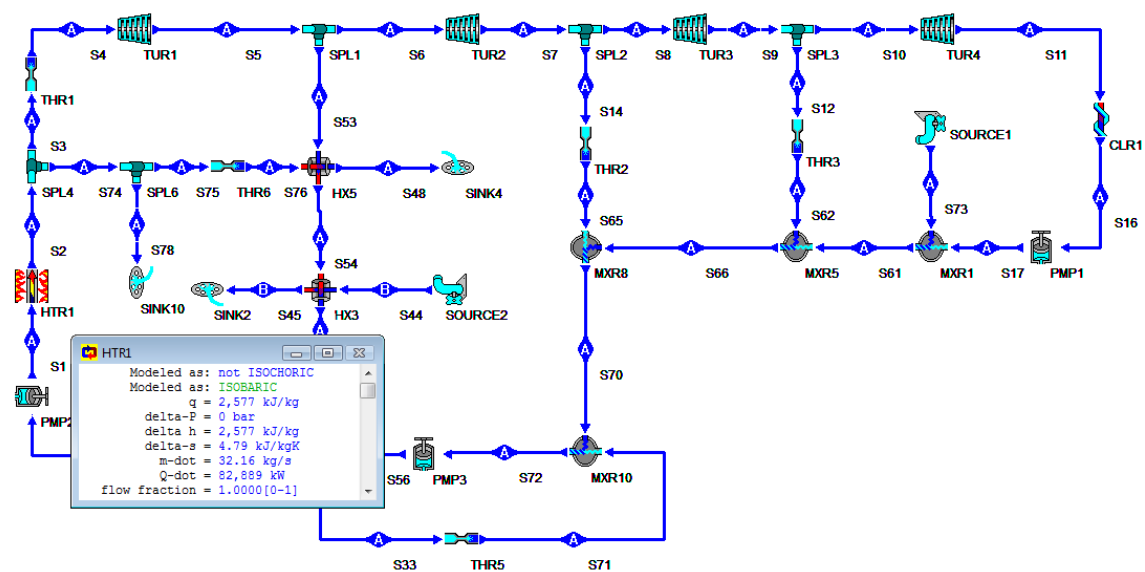


Figura 5.9 - Parâmetros de operação da caldeira

5.4.4.4 PERMUTADORES DE CALOR

Os permutadores de calor têm por objetivo a transferência de calor sensível e latente entre duas correntes materiais: uma dita fria e outra dita quente. Esta transferência de calor pode dar-se entre correntes materiais de diferente estado físico e natureza.

No presente caso estão contemplados três permutadores de calor com separação de correntes materiais, sendo que ocorrem ainda processos de mistura de correntes materiais da mesma natureza, identificados na Figura 5.3 com a designação MXR (ex: aquecimento de condensados com vapor).

O permutador HX5 faz o sobreaquecimento do vapor resultante da primeira extração (corrente fria, vapor saturado a 5 bar a 152°C) com o vapor de purga da caldeira após laminagem (corrente quente; vapor a 10bar e 347°C), obtendo assim (vapor sobreaquecido, a 4 bar a 250°C).

O permutador HX3 faz o pré-aquecimento do ar de combustão (corrente fria a 25°C, 1atm) com o vapor resultante do permutador HX5 (corrente quente) por forma a obter uma corrente de ar quente (170°C, 1atm), resultando uma corrente de vapor saturado (3,5bar e 138,9°C).

O permutador HX4 faz o pré-aquecimento da água de alimentação à caldeira (corrente fria; água líquida a 14 bar, 110°C) com a mistura resultante de HX3 (corrente quente,

vapor saturado 3,5 bar, 138,9°C) que depois devolve ao tanque de condensados (1,5 bar), obtendo uma corrente de água aquecida (14 bar, 135°C), (ver Figura 5.10).

A otimização destes aproveitamentos vs recuperações de energia é objeto de uma análise específica denominada análise Pinch, que não é aplicada neste trabalho.

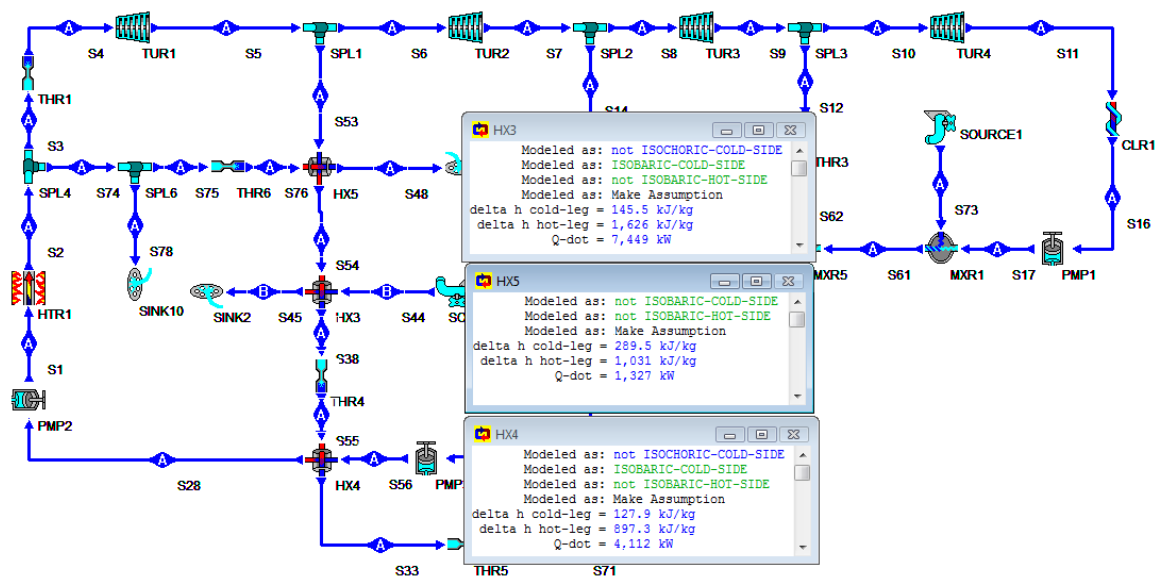


Figura 5.10 - Condições de operação impostas aos permutadores de calor

5.4.5 RENDIMENTO DE CONVERSÃO DE ENERGIA

O rendimento de conversão de energia do ciclo calcula-se a partir dos resultados anteriores, nomeadamente tendo em conta a potência mecânica útil disponibilizada e a quantidade de calor recebida da fonte quente (caldeira).

A potência mecânica útil disponibilizada é a diferença entre a potência mecânica produzida na turbina pela expansão do vapor e a potência mecânica consumida quer pelas bombas de compressão do líquido quer pelos aerocondensadores para movimentação de ar de arrefecimento.

A quantidade de calor recebida pela caldeira a partir dos gases quentes da combustão é determinada pela diferença entálpica do fluido medida entre a entrada e a saída da caldeira multiplicada pelo caudal mássico do fluido.

Neste âmbito e usando como exemplo o caso de estudo da LIPOR, verifica-se que a produção permanente de 82,9MWth de calor nas caldeiras de incineração faz-se com a

combustão de 1100 ton/dia de resíduo urbanos e com uma quantidade variável de combustível auxiliar, que depende do teor de humidade dos resíduos.

Nas referidas circunstâncias, o rendimento do ciclo termodinâmico de Rankine em trabalho mecânico é de 30,5%, mas o rendimento em electricidade introduzida na rede de acordo com a entidade que explora o sistema que constitui o caso de estudo deste trabalho é de 27,1% (ver Tabela 5.6).

Tabela 5.6 - Resumo do funcionamento do ciclo Rankine

Entidade	Quantidade	Unidades
Caudal de vapor total (2linhas)	32,16	kg/s
Entalpia específica à entrada das caldeiras	574	kJ/kg
Entalpia específica à saída das caldeiras	3151	kJ/kg
Potência térmica útil das caldeiras	82,88	MWth
Potência mecânica produzida pela turbina	26,00	MW
Potência térmica perdida com sopragem	0,95	MWth
Potência térmica perdida com purga	2,73	MWth
Potência térmica rejeitada no aerocondensador	46,10	MWth
Potência térmica de aquecimento de ar de combustão	7,50	MWth
Potência mecânica consumida pelas bombas	0,22	MWe
Potência mecânica consumida pelos aerocondensadores	0,54	MWe
Potência elétrica adicional consumida (utilidades+irreversibilidades)	2,74	MWe
Produção líquida de trabalho (rede elétrica)	22,5	MWe
Rendimento do ciclo em electricidade	0,271	
Rendimento do ciclo em trabalho mecânico	0,305	

5.5 ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA FÓRMULA R1

A avaliação da recuperação de energia a partir da incineração de resíduos é efetuada com recurso não só à produção de trabalho mecânico mas também de calor útil, tendo ainda em conta as quantidades de energia associadas aos resíduos como também associadas ao uso de combustível auxiliar através da fórmula R1 (ver a seção 1.6) que basicamente é um indicador da recuperação de energia a partir da incineração de resíduos. Este indicador aplica-se à recuperação de energia a partir dos resíduos e distingue as operações de valorização (se a eficiência R1 for superior a 0,6 das operações de eliminação de resíduos (se a eficiência R1 for inferior a 0,6) (ver Anexo II da Diretiva-Quadro dos resíduos nº 2008/98/CE transposta pelo DL nº 73/2011 de 17 de Junho).

5.5.1 EFICIÊNCIA R1

Nas circunstâncias atrás descritas, foi efetuada uma simulação do aproveitamento de energia que permitiu obter os resultados do Anexo C. Esta simulação teve em especial atenção o efeito da humidade presente nos resíduos, tendo sido efetuada a partir do modelo em Excel de balanço mássico e energético desenvolvido para este trabalho.

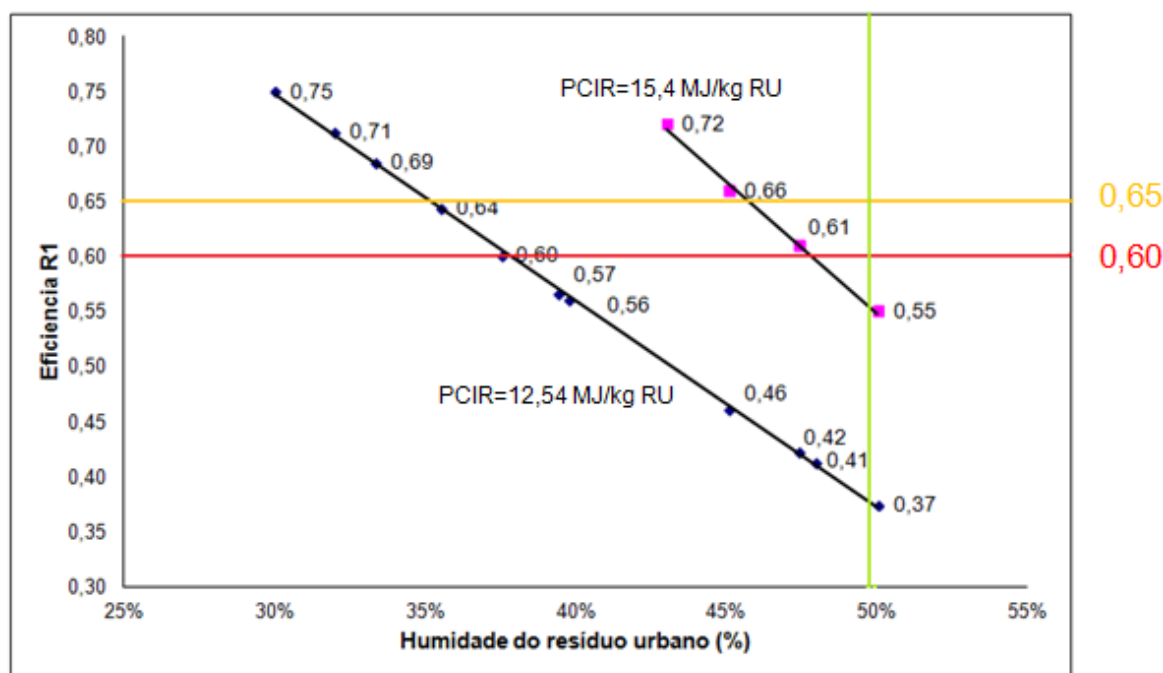


Figura 5.11 - Eficiência R1 em função do teor de humidade dos resíduos.

Tendo em consideração os valores do poder calorífico dos resíduos com o mesmo conteúdo de humidade de 50% em btq como se pode observar na Figura 5.11 consegue-se atingir valor mais alto da eficiência R1. A análise da informação obtida permitiu concluir que a eficiência R1 diminui com o aumento do teor de humidade dos resíduos e aumenta com o aumento do poder calorífico dos resíduos.

5.5.2 PROCESSOS DE MELHORIA DA EFICIÊNCIA DE ACORDO COM A FÓRMULA R1

A melhoria de desempenho da incineração de resíduos para efeitos de recuperação de energia, expresso como eficiência R1, pode ser conseguida através dos seguintes processos de operação:

- O reaquecimento do vapor

-
- Aumentar a pressão de serviço da caldeira e da entrada da turbina;
 - Reduzir as perdas através das purgas da caldeira;
 - Controlar a situação dos condensados e otimizar o aproveitamento da energia das extrações.

Em relação as medidas que têm que se tomar em consideração na qualidade dos resíduos a incinerar, deve-se diminuir a humidade dos resíduos, de forma a aumentar o poder calorífico dos resíduos, e assim recuperar mais quantidade de energia. Realmente para obter teores de humidade compatíveis com a valorização $R1=0,65$ os resíduos deveriam apresentar um teor máximo de cerca 35% de humidade (ver Anexo C).

Por outro lado, a unidade de incineração descarta no ambiente uma grande quantidade de energia térmica através do aerocondensador, produzindo ar quente e com baixo teor de humidade, que poderia ser adequada para um qualquer processo de secagem de baixa entalpia, nomeadamente a secagem dos próprios resíduos. Contudo esta possibilidade apresenta inconvenientes que estão ligados à natureza insalubre dos resíduos urbanos, que obrigaria ao tratamento dos efluentes gasosos do processo de secagem e naturalmente à instalação de um equipamento apropriado ao efeito de secagem com tratamento de efluentes gasosos.

Para aumentar a eficiência do processo de incineração, Reimann (2012), propõe as seguintes alternativas de otimização da recuperação de energia:

- Aumentar o consumo de calor na forma de vapor, fazendo distribuição de calor ou frio para redes (*district heating* ou *district cooling*), respetivamente) se houver procura dos produtos mencionados. Embora extremamente eficaz, este processo exige médio a muito alto investimento, não sendo aplicável para utilizadores afastados, dependendo das condições climáticas ou seja do período de procura de calor e/ou frio e do preço local da energia.
- Aumentar a produção de eletricidade o que impõe novas aquisições de tecnologia mais eficiente de recuperação de calor e de aumento da eficiência elétrica. Requer médio a alto investimento, aumentando os custos de manutenção, não sendo viável para todas as situações.
- Otimização dos processos térmicos. Requer baixo a médio investimento, mas apresenta baixo a médio impacto na recuperação de energia.

- Otimização dos consumos da energia recuperada e da energia primária. Requer baixo a médio investimento, mas apresenta baixo a médio impacto na recuperação de energia.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O problema dos resíduos urbanos (RU) só poderá ser solucionado através da educação ambiental, redução do consumo e adoção de práticas ecologicamente corretas de gestão. A adoção de sistemática de separação e segregação na origem de materiais com valor de mercado, principalmente daqueles que já não sendo ambiental, técnica e economicamente apropriados para valorização material em virtude do estado de sujidade ou contaminação são melhores combustíveis, por certo contribuirão para a redução da quantidade de energia que pode ser recuperada através do processo de incineração controlada. A incineração em si apresenta-se como um método de valorização ou de eliminação tendo a vantagem da recuperação do conteúdo energético do resíduo e diminuição da quantidade de resíduo destinada para o aterro.

A eficiência da recuperação de energia do processo de incineração é fortemente condicionada pela utilidade que possa apresentar o calor residual que normalmente é descarregado para a fonte fria.

6.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que o balanço mássico e energético é complementado com a análise termodinâmica do ciclo de Rankine, permitindo ambas representar o essencial do processo de incineração de resíduos urbanos sob os pontos de vista técnico e ambiental.

A aplicação dos referidos modelos ao caso de estudo permitiu concluir que a manutenção da incineração de 1100 ton/dia de resíduos urbanos em condições apropriadas ao longo do ano, exige a utilização de combustível auxiliar, em particular quando o teor de humidade dos resíduos é superior a cerca de 30%, por forma a assegurar a produção cerca de 82,9MW de potência térmica disponível para produção de vapor para que seja possível assegurar a produção de trabalho mecânico (energia elétrica vendida à rede) de cerca de 22MWe. Neste âmbito mais de 46MW de potência térmica é rejeitada para o ambiente atmosférico sem qualquer utilidade.

Em relação à aplicação da fórmula R1, a melhoria da eficiência do processo, nomeadamente conseguir que a incineração possa ser considerada uma operação e de valorização, exige uma aplicação útil para o calor residual (aquecimento, secagem, *etc.*), donde se conclui que nas atuais circunstâncias não será possível a uma instalação de

incineração a operar nas condições estudadas atingir os níveis de eficiência que suportem o estatuto de valorização de resíduos, tendo em conta os teores de humidade e o poder calorífico com que os resíduos se apresentam para incineração. De acordo com os cálculos efetuados e tendo em conta as limitações do trabalho, calcula-se que só com teores de humidade de resíduos urbanos inferior a 37% é possível que a incineração de resíduos possa atingir o estatuto de operação de valorização (eficiência $R1 > 60\%$), mesmo consumindo gás natural como combustível auxiliar em permanência e tendo em conta os considerandos de idealidade.

A atender ao facto de o poder calorífico médio dos resíduos urbanos indicado pela Lipor ser de 7,7 MJ/kg em base tal e qual mas referente a um teor de humidade indicado entre 45 a 50% de humidade (correspondente a um PCI em base seca entre 14,0 e 15,4 MJ/kg), as expectativas de dispêndio de gás natural viriam mais diminuídas e haveria uma melhoria do valor de eficiência R1.

6.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

O trabalho desenvolvido destina-se ao cálculo do balanço mássico e balanço energético, sendo que para tal alguns dos dados foram retirados da literatura técnica, outros amavelmente cedidos pelos responsáveis pela operação de uma unidade de incineração e outros recolhidos da web.

A análise aos dados disponíveis sobre as condições de operação (pressão, temperatura, etc.), permitiu constatar algumas incoerências que são fruto da variabilidade esperada tendo em conta a diversidade das fontes utilizadas e que foram resolvidas tecnicamente da forma que se entendeu mais adequada às diferentes circunstâncias.

O desenvolvimento do modelo do ciclo Rankine com base na aplicação CyclePad embora tenha sido capaz de representar no essencial o diagrama termodinâmico que foi desenvolvido, revelou algumas limitações de rigor e capacidade de representação/cálculo que importa ponderar e analisar.

6.3 SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO

O trabalho desenvolvido apresenta limitações nomeadamente em relação à representatividade das variáveis de ensaio sugerindo-se assim que uma avaliação mais rigorosa ocorra de uma forma estatisticamente adequada.

Em relação aos considerandos de idealidade usados na representação do ciclo de Rankine, sugere-se as referidas condições sejam revistas por forma a dispor-se de um modelo do processo mais realista. Mas para que isto seja viável, e em relação ao caso de estudo, é necessário dispor de uma mais detalhada descrição do equipamento instalado e das condições operatórias, de um historial operatório com um período apropriado dos diferentes equipamentos e, se possível, ainda dispor de estimativas para a irreversibilidade dos equipamentos.

Neste âmbito seria também necessário dispor de uma ferramenta de simulação do ciclo Rankine com mais capacidade de representação e análise que a aplicação CyclePad.

Referências bibliográficas

- APA., Agência Portuguesa do Ambiente (2010): PERSU II "Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos 2007-2016. Relatório de acompanhamento 2010. Acedido em (5-09-2013).
- APA., Agência Portuguesa do Ambiente (2011)., Relatório Anual dos Resíduos Urbanos RARU 2011. Acedido em (5-09-2013).
- Çengel, Y. A., Boles, M. A., (2001) "Termodinâmica", 3ª Edição, McGraw-Hill.
- CIWM, November (2003)," Energy from Waste: A good practice guide", The Chartered Institution of Wastes Management, Published by IWM Business Services Ltd, ISBN: 0-902944-54-1.
- Formosinho, S., Pio, C., Barros, H., Cavalheiro, J., (2001), "Parecer relativo ao tratamento de resíduos industriais perigosos", Comissão Científica Independente de Controlo e Fiscalização Ambiental da Co-Incinação, Principia – Publicações Universitárias e Científicas.
- Cardoso, L., (2010), CARACTERIZAÇÃO DAS EMISSÕES GASOSAS DA CENTRAL DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DA LIPOR Análise da Eficiência do Sistema de Tratamento de Gases, Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Grosso, M., Motta, A., and Rigamonti, L., (2010), "Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive", Waste Management 30, Pag.1238–1243.
- Consonni, S., Giugliano, M., Grosso, M., (2005), Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste, Part A: Mass and energy balances., Waste Management 25 pp. 123–135.
- IPPC, BREF, (2006), Integrated Pollution Prevention and Control. Draft Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, European Commission, Seville-Spain, acedido em (8-06-2013) no site: <http://eippcb.jrc.es>
- Lipor, (2013), Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto, Acedido em: 10-01-2013,: <http://www.lipor.pt>.
- Lipor, (2013), Plano Estratégico dos Resíduos 2007-2016, acedido em (5-09-2013) http://www.LIPOR.pt/fotos/editor2/plano_estrategico_2007_20016.pdf.
- Lipor, (2009), Guia para uma gestão sustentável dos resíduos. Edição para autarcas. Acedido em 10-05-2013 http://www.rcc.gov.pt/SiteCollectionDocuments/ManualAutarca_LIPOR.pdf.
- Matos, M.A.A., (2006). "Tratamento Termoquímico de Resíduos", Apontamentos da disciplina de Tratamento e Gestão de Resíduos Sólidos Capítulo 5, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.
- Matos, M.A.A., (2011). "Combustíveis fósseis", Apontamentos da disciplina de Conversão de Energias Convencionais, Capítulo 1, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.
- Neto, F., (2011), "O Ciclo de Rankine", Apontamentos de Conversão de Energias Convencionais, Aula 19-20, 2010-2011, Departamento Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- Oliveira, P., (2012), "Fundamentos de Termodinâmica Aplicada - Análise Energética e Exegética", Editora LIDEL.

-
- PERSU II, (2007) Plano Estratégico para os resíduos Sólidos Urbanos 2007-2016, Portaria 187/2007 de 12 de fevereiro.
- PERSU II, (2010) Plano Estratégico para os resíduos Sólidos Urbanos 2007-2016, Relatório de acompanhamento 2010, acedido em (10-09-2013) www.apambiente.pt
- PERSU 2020, (2013). Plano estratégico para os resíduos urbanos – uma fonte renovável de recursos. Proposta. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia. Acedido em (20-11-2013), <http://www.portugal.gov.pt/media/1218711/20131017%20maote%20apres%20persu.pdf>
- Port'Ambiente, "Lipor II- Valorização energética de 1200 toneladas de resíduos urbanos por dia, ao serviço do desenvolvimento sustentável". Porto Lipor II, acedido em (1-07-2013):http://www.lipor.pt/upload/Lipor/ficheiros/Apresenta%C3%A7%C3%A3o_CSR_Jose%20Paulo_Port'Ambiente.pdf.
- Reimann D., (2012), CEWEP Energy Report II (Status 2007-2010), Results of Specific Data for Energy, R1 Plant Efficiency factor and Net Calorific Value (NCV) of 314 European WtE Plants, acedido em (1-11-2013) no site http://www.cewep.com/storage/med/media/statements/257_09_04_29_final_version_CEWEP-Report.pdf?fCMS=faa940f1597c399f780ccd56ff3199d4.
- RS, Relatório de Sustentabilidade Lipor., (2012), Acedido em 1-05-2010 <http://www.lipor.pt/pt/bibliotecas/relatorio-de-sustentabilidade/>.
- Santos, J. (2007), Caracterização físico-química e biológica em diferentes laboratórios de produtos obtidos a partir da compostagem de resíduos orgânicos Biodegradáveis (Dissertação de Mestrado em Ecologia Aplicada, Faculdade de Ciências), Universidade do Porto, Porto.
- Scala, F., Chirone, R., (2004), "Fluidized bed combustion of alternative solid fuels", Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 28, pag 691-699.
- Seifert, H., Vehlow, J., Hunsinger, H., (2012), "Advanced WtE in Europe", Karlsruhe Institute of Technology, Seminar in Advanced WtE Technologies, Lahi, Finland
- Stengler, E., (2010), Waste Management World, "On the road to Recovery: Achieving R1 Status" Acedido em (6-08-2013) no site <http://www.waste-management-world.com/articles/2010/11/on-the-road-to-recovery-achieving-r1-status-.html>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H.S., (1996), Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill, Inc. International Ed.
- Teibert, C., (2006), "The energy efficiency formula of annex II of the waste framework directive - A critical review", 5th Draft version, OKOPOL - Institute for Environmental Strategies, June 2006 .
- EC,EDG, (2011)., Guidelines on the interpretation of the R1 energy efficiency formula for incineration facility dedicated to the processing of municipal solid waste according to Annex II of Directive 2008/98/EC of waste. European Commission, Environmental Directorate General. June 2011.
- Worrell, W., Aarine Vesilind, (2010), "Solid waste engineering", Second Edition, Cengage Learning.USA
- Williams, P. T., (2005), Waste treatment and disposal. 2nd Edition. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex.

WBTGR, (1999), World Bank Technical Guidance Report. "Municipal Solid Waste Incineration", The International Bank for Reconstruction and Development, USA.

Yin, C., Rosendahl, L., Kaer, R., 2008, "Grate-firing of biomass for heat and power production", Progress in Energy and Combustion, SCIENCE, vol.34, pag.: 725-754.

Sites consultados:

Agência Portuguesa do Ambiente (APA), 2013. "Resíduos Urbanos". acedido em (10-08-2013) <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=933>

Agência Portuguesa do Ambiente (APA), 2013. "Resíduos Urbanos". acedido em (10-08-2013) <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=933&sub3ref=936>

Decretos de lei e Diretivas utilizados

Decreto-Lei nº 85/2005 de 28 de Abril, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território: Estabelece o regime legal da incineração e co-incineração.

Decreto-Lei nº 178/2006 D.R. n.º 171, Série I de 2006-09-05: Aprova o regime geral da gestão de resíduos, transpondo para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2006/12/CE.

Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de Junho - Procede à terceira alteração ao Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, transpõe a Diretiva n.º 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro, relativa aos resíduos, e procede à alteração de diversos regimes jurídicos na área dos resíduos

DIRETIVA 2000/76/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 4 de Dezembro de relativa à incineração de resíduos.

DIRETIVA 2008/98/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 19 de Novembro de 2008: Relativa aos resíduos e que revoga certas diretivas.

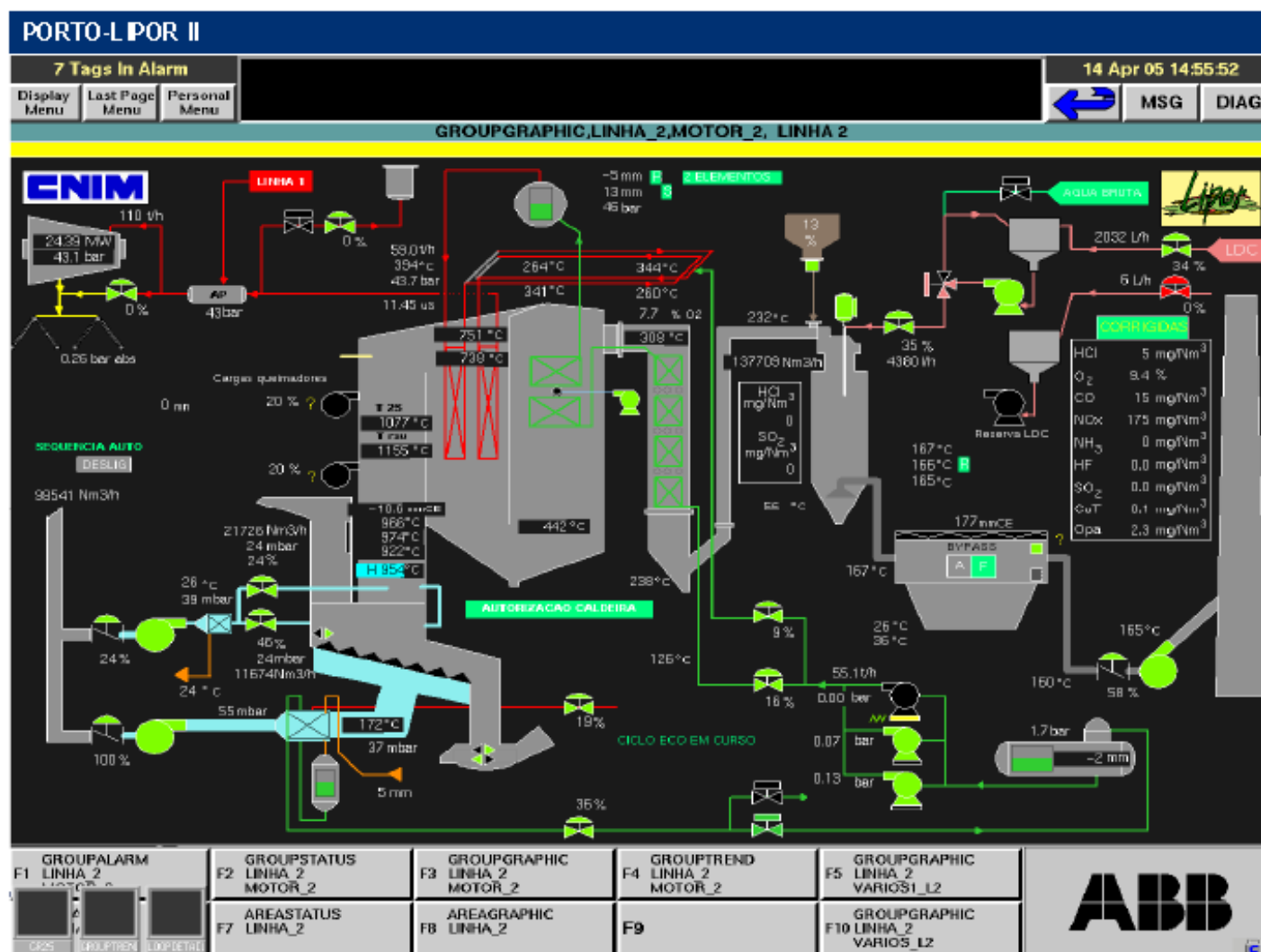
Anexo A – Inquérito ao processo de incineração de resíduos da LIPOR

Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro				
Incineração de resíduos urbanos na LIPOR				
Data dos registos:				
Autores: Prof. Arlindo Matos e mestranda Elena Casian (Junho de 2013)				
Condição instantânea de exploração do sistema de incineração				
Incinerador				
Caracterização da alimentação do incinerador	unidades	INCINERADOR 1	INCINERADOR 2	Obs.
Caudal de resíduos urbanos	ton/dia	600		Incinerador 2 opera nas mesmas condições do incinerador 1
Teor de humidade (btq)	%	47		Entre 45 e 50%
Caudal mássico de ar	kg Air/h	-		
Caudal volumétrico de ar	Nm3 Air/h	90000		
Temperatura do ar primário	°C	170		
Depressão na câmara de incineração	mmH2O	-5		
Rácio ar primário/ar secundário				
Caudal ar secundário	Nm3 Air/h	20000		
Caracterização do incinerador				Obs.
Temperatura de incineração dos gases	°C	880		Topo fornalha ou câmara de combustão
Temperatura de incineração (parede interna)	°C			Desconhecido
Temperatura da parede externa	°C	50		
Dimensões externas do incinerador (Largura)	m	7		
Dimensões externas do incinerador (Profundidade)	m	12		
Dimensões externas do incinerador (Altura)	m	18		
Área externa do incinerador	m2	1512		

Efluentes Gasosos		Saída da caldeira	Entrada da chama	Obs.
Temperatura	°C	240	155	
Composição CO ₂ (base seca)	%		9	
Composição O ₂ (base seca)	%		9	
Composição H ₂ O (base seca)	%		25	
Composição NO _x (base seca)	mg/Nm ³	550	180	
Composição CO (base seca)	mg/Nm ³		10	
Composição SO ₂ (base seca)	mg/Nm ³		10	
Concentração de partículas	mg/Nm ³	6000	3	
Teor de carbono dos volantes (COT)	mg/Nm ³		1	
Escórias (cinzas de fundo)				Obs.
Temperatura	°C			Desconhecido
Caudal das escórias	ton/dia	120		Cerca de 20% do caudal de resíduo em massa
Teor de carbono das escórias	%	1,5		

Caracterização do ciclo de vapor				
Caldeira				
Pressão de água à entrada caldeira	Bar	50		
Temperatura de entrada da água na caldeira	°C	130		A água é pré-aquecida no desgasificador, com vapor da 1 extração 4 bar
Pressão de vapor à saída da caldeira	Bar	43		
Temperatura de vapor à saída da caldeira	°C	395		
Caudal mássico de vapor	kg/s	16,388		Cerca de 59 ton/h
Turbina				
Pressão de vapor à entrada da turbina	Bar	43		
Temperatura de vapor à entrada turbina	°C	392		
Pressão de vapor à saída da turbina	Bar	0,2		
Temperatura de vapor à saída da turbina	°C	60		
Caudal de extração de vapor (1ª extração)	kg/s			Desconhecido
Pressão de vapor de extração (1ª extração)	bar	4		Para aquecer a água de alimentação a bomba, e o ar primário
Caudal de extração de vapor (2ª extração)	kg/s			Desconhecido
Pressão de vapor de extração (2ª extração)	bar	2		Para aquecimento dos condensados
Caudal de extração de vapor (3ª extração)	kg/s			Desconhecido
Pressão de vapor de extração (3ª extração)	bar	1		Para aquecimento dos condensados
Potência mecânica útil da turbina	MW	26,5		
Potência elétrica introduzida na rede	MW	22,5		
Aerocondensador				
Temperatura entrada do condensador	°C	57		Entre 55 -60°C
Pressão de entrada do condensador	Bar	0,2		Pressão absoluta
Titulo do vapor à entrada do condensador	%			Desconhecido
Temperatura à saída do condensador	°C	45		
Pressão à saída do condensador	Bar	1		
Accionamento dos aerogeradores		Electrico		
Potência elétrica dos aerogeradores em funcionamento	kW	540		6 Aerogeradores a 90 kW cada
Bomba da caldeira				
Temperatura da água à entrada da bomba	°C	135		
Pressão da água à entrada da bomba	Bar	1,7		
Temperatura da água à saída da bomba	°C	135		
Pressão da água à saída da bomba	Bar	65		
Accionamento da bomba		Electrico		
Potência elétrica da bomba	kW	230		

Anexo B – Sinóptico da incineração de resíduos da LIPOR



Anexo C – Quadro de simulação da eficiencia R1 da unidade de incineração

	Unidades	Condição1	Condição2	Condição3	Condição4	Condição5	Condição6	Condição7	Condição8	Condição9	Condição10	Condição11
Resíduos												
Humidade (btq)	%	30%	32%	33%	35,5%	37,5%	39%	40%	45%	47%	48%	50%
Poder calorífico Inferior (btq)	MJ/kg	8,77	8,54	8,37	8,10	7,84	7,60	7,56	6,89	6,60	6,54	6,27
Caudal (btq)	ton/dia	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Gás Natural												
Poder calorífico Inferior (btq)	MJ/kg	45,09	45,09	45,09	45,09	45,09	45,09	45,09	45,09	45,09	45,09	45,09
Caudal	ton/dia	2	9	14	22	30	37	38	58	66	68	76
Produtos de combustão												
Caudal Total	ton/dia	7625	7564	7521	7454	7399	7339	7322	7161	7079	7061	7000
Caudal de Escorias	ton/dia	251	244	239	232	224	218	216	197	189	187	180
Composição dos Efluentes												
CO2 (bs)	%	10,2%	10,3%	10,3%	10,3%	10,4%	10,4%	10,4%	10,5%	10,5%	10,5%	10,6%
H2O (btq)	%	17,1%	17,7%	18,1%	18,8%	19,4%	19,9%	20,1%	21,7%	22,4%	22,6%	23,3%
O2 (bs)	%	9,6%	9,4%	9,3%	9,1%	8,9%	8,8%	8,8%	8,3%	8,0%	8,0%	7,8%
N2 (bs)	%	80,2%	80,3%	80,4%	80,5%	80,7%	80,8%	80,8%	81,2%	81,4%	81,5%	81,6%
Desempenho energético												
Potencia termica disponível	MWth	82,88	82,88	82,88	82,88	82,88	82,88	82,88	82,88	82,88	82,88	82,88
Potencia mecânica produzida	MWe	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
Potencia mecânica consumida	MWe	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Potência termica exportada	MWth	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50
Energia importada (elec/2012)	GJ	1469	1469	1469	1469	1469	1469	1469	1469	1469	1469	1469
Rendimento mecanico	%	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Recuperação de energia												
Ep	GJ	2373624	2373624	2373624	2373624	2373624	2373624	2373624	2373624	2373624	2373624	2373624
Ef	GJ	29758	133911	208306	327337	446369	550522	565401	862981	982012	1011770	1130802
Ew	GJ	3185160	3098489	3036519	2938567	2846736	2760472	2743842	2502625	2397252	2372280	2277389
Ei	GJ	3819	3819	3819	3819	3819	3819	3819	3819	3819	3819	3819
Eficiência Energética R1		0,75	0,71	0,69	0,64	0,60	0,57	0,56	0,46	0,42	0,41	0,37